

Universidad Carlos III de Madrid  
Escuela Politécnica Superior  
Departamento de Ingeniería Eléctrica



## PROYECTO FIN DE CARRERA

Titulación: Ingeniería Técnica Industrial en Electricidad

# HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Leganés, Julio 2013

**Autor:** Juan Antonio Martín Moreno  
**Tutora:** Sandra Castaño Solís  
**Directora:** Lucía Gauchía Babé



Título: Herramienta de simulación de vehículos eléctricos.

Autor: Juan Antonio Martín Moreno

Tutor: Sandra Patricia Castaño Solís

## EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2013 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



## Agradecimientos

Por haber estado ahí tanto en los buenos como en los malos momentos me gustaría agradecer la compañía y el apoyo recibido a todas las personas que me acompañan en el largo camino que me lleva a conseguir mis objetivos.

A mis padres, por su sincero apoyo y por haber confiado siempre en mí permitiéndome desarrollarme libremente en lo que he querido y animándome a afrontar nuevos desafíos.

A mi hermana Mónica, por su constancia, que me ha servido de referente.

A mis tíos y tías por haberme demostrado su cariño al haber estado ahí cuando los he necesitado.

A las personas que me han guiado para que sea posible este proyecto, mis tutoras Lucía y Sandra, por haberme enseñado y guiado a poder desarrollar este proyecto atendiendo mis dudas.

A mis compañeros de clase, Jorge, Ángel, Pablo, Fran, Noé y demás compañeros por todos los buenos momentos que hemos pasado y por todo lo aprendido de los malos momentos, y sobre todo por haber hecho más amenos los días de prácticas y estudio compartiendo dudas.

A mis amigos por todos los buenos momentos compartidos y por estar ahí dispuestos siempre a compartir momentos inolvidables.

A mis jefes de Unión Fenosa Distribución por darme la oportunidad de comenzar a demostrar que lo aprendido en este viaje ha servido de algo.

A todos y cada uno de vosotros por las aportaciones a este proyecto fin de carrera que lleva un parte de todos vosotros, espero poder devolveros todo lo dado. Muchas gracias de todo corazón.

## Resumen

En este proyecto se desarrolla una herramienta que permite simular el comportamiento de un vehículo eléctrico en función de la configuración de determinados parámetros constructivos a lo largo de un ciclo de conducción establecido para conseguir obtener una aproximación de la duración de la batería y de la autonomía del vehículo.

El fin que se persigue con la herramienta creada en este proyecto es permitir a los alumnos comprender el funcionamiento de un vehículo eléctrico de cara a posibles aplicaciones docentes en el departamento de ingeniería eléctrica ayudando al alumno a realizar simulaciones de sistemas complejos previamente creados por personal docente bien sean programados en un determinado código o bien elaborados en Simulink mediante una sencilla interfaz gráfica.

### Palabras clave y acrónimos:

Vehículo eléctrico (En muchas ocasiones nos referiremos a él como “VE”)

VEB: Vehículo eléctrico de batería

Batería

Ciclo de conducción

GUI: Graphical User Interface – Interfaz Gráfica de Usuario

Simulink

Simulación

## Abstract

This project develops a tool that allows simulating the behavior of an electric vehicle based on configuration of constructive parameters along a specific driving cycle to obtain an approximation of the duration of the battery and the range of the vehicle.

The purpose of this project is allowing students to understand the electrical vehicle response for future educational applications in the department of electrical engineering. In addition, help the students to perform simulations of difficult systems previously created by teachers scheduled in Matlab or made by Simulink through a user interface.

### Keywords:

Electric vehicle (or sometimes will be show as EV)

BEV: Battery Electric Vehicle

Battery

Driving cycle

GUI: Graphical User Interface

Simulink

Simulation

# Índice general

<b>Resumen .....</b>	<b>6</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>7</b>
<b>Motivación .....</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 1: Introducción y objetivos .....</b>	<b>15</b>
1.1 Introducción .....	15
1.2 Objetivos .....	16
1.3 Fases del desarrollo .....	16
1.4 Medios empleados .....	16
<b>Capítulo 2: Herramientas de diseño de vehículos eléctricos .....</b>	<b>17</b>
2.1 Introducción .....	17
2.2 Virtual-Car .....	18
2.3 iEV .....	20
2.4 Conclusión .....	21
<b>Capítulo 3: Introducción al vehículo eléctrico .....</b>	<b>22</b>
3.1 Vehículo eléctrico .....	22
3.2 Historia del vehículo eléctrico .....	23
3.3 Tipos de vehículos eléctricos .....	25
3.3.1 Vehículo eléctrico puro. ....	25
3.3.2 Vehículo con pila de combustible .....	26
3.3.3 Vehículo híbrido en serie .....	26
3.3.4 Vehículo híbrido en paralelo .....	27
<b>Capítulo 4: Baterías .....</b>	<b>28</b>
4.1 Introducción .....	28
4.2 Fundamentos básicos de una batería .....	29
4.3 Parámetros electroquímicos de las baterías recargables .....	30
4.4 Tipos de baterías .....	32
4.4.1 Plomo-Ácido .....	33
4.4.2 Baterías de base Níquel .....	35
4.4.3 Litio .....	36
4.5 Conclusión .....	37
<b>Capítulo 5: Representación de un modelo de un vehículo eléctrico .....</b>	<b>41</b>
5.1 Introducción .....	41



5.2 Modelado de las fuerzas actuantes sobre un vehículo .....	42
5.3 Modelado de la batería .....	47
5.4 Proceso de cálculo de la autonomía del vehículo .....	51
<b>Capítulo 6: Representación macroscópica energética de un vehículo eléctrico mediante Simulink .....</b>	<b>54</b>
6.1 Introducción .....	54
6.2 Representación Energética Macroscópica (EMR) .....	55
6.3 Simulación de un vehículo eléctrico con representación macroscópica energética .....	55
<b>Capítulo 7: Ciclos de conducción .....</b>	<b>69</b>
7.1 Introducción .....	69
7.2 Ciclos de conducción normalizados .....	70
7.2.1 ECE-15 .....	70
7.2.2 EUDC.....	70
7.2.3 EUDCL.....	71
7.2.4 NEDC.....	72
7.3 Ciclo de conducción experimental .....	73
<b>Capítulo 8: Herramienta de diseño de vehículos eléctricos.....</b>	<b>75</b>
8.1 Introducción .....	75
8.2 Interfaz gráfica. GUIDE .....	76
8.3 Herramienta CicloSim.....	80
8.4 Método 1: Modelo de Larminie. ....	81
8.5 Método 2: Modelo de Simulink.....	85
<b>Capítulo 9: Presentación de resultados.....</b>	<b>96</b>
9.1 Introducción .....	96
9.2 Catalogo Movele .....	96
9.3 Caso 1 .....	98
9.4 Caso 2 .....	100
9.5 Caso 3 .....	102
9.6 Caso 4 .....	104
9.7 Resumen de resultados obtenidos.....	106
<b>Capítulo 10: Conclusiones .....</b>	<b>107</b>
<b>Capítulo 11: Aplicación y líneas futuras .....</b>	<b>108</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>109</b>
Libros .....	109

Artículos: .....	109
Contenidos web: .....	110
<b>Anexos .....</b>	<b>111</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 2.1</b>	Interfaz del programa Virtual Car.....	18
<b>Figura 2.2</b>	Gráfica de resultados Virtual Car.....	19
<b>Figura 2.3</b>	Interfaz iEV.....	20
<b>Figura 3.1</b>	Vehículo eléctrico de primeros del siglo XX .....	23
<b>Figura 3.2</b>	Esquema vehículo eléctrico puro.....	26
<b>Figura 3.3</b>	Esquema vehículo híbrido serie .....	27
<b>Figura 3.4</b>	Esquema vehículo híbrido paralelo .....	27
<b>Figura 4.1</b>	Esquema funcionamiento batería.....	29
<b>Figura 5.1</b>	Fuerzas actuantes sobre un vehículo.....	42
<b>Figura 5.2</b>	Esquema de funcionamiento real de una batería .....	48
<b>Figura 5.3</b>	Diagrama de flujo del proceso de cálculo de las fuerzas sobre el vehículo.....	52
<b>Figura 6.1</b>	Acción-reacción entre dos elementos.....	56
<b>Figura 6.2</b>	Bloque representativo del chopper.....	57
<b>Figura 6.3</b>	Bloque representativo de la máquina eléctrica.....	58
<b>Figura 6.4</b>	Bloque de la transmisión .....	58
<b>Figura 6.5</b>	Bloque del diferencial .....	59
<b>Figura 6.6</b>	Bloque del eje de ruedas.....	59
<b>Figura 6.7</b>	Diagrama de giro del vehículo.....	60
<b>Figura 6.8</b>	Bloques del giro de la ruedas.....	61
<b>Figura 6.9</b>	Conversor entre la velocidad del vehículo y la fuerza que se opone .....	62
<b>Figura 6.10</b>	Resultado de la composición de todos los bloques.....	62
<b>Figura 6.11</b>	Inductancia de la máquina eléctrica .....	63
<b>Figura 6.12</b>	Inversión del sistema de almacenamiento de energía.....	64
<b>Figura 6.13</b>	Inversión del chasis .....	65
<b>Figura 6.14</b>	Inversión del eje de ruedas .....	65
<b>Figura 6.15</b>	Inversión del diferencial .....	66
<b>Figura 6.16</b>	Inversión de la transmisión-caja de cambios.....	66
<b>Figura 6.17</b>	Inversión de la máquina eléctrica .....	66
<b>Figura 6.18</b>	Inversión de la inductancia .....	67
<b>Figura 6.20</b>	Diagrama completo .....	68
<b>Figura 7.1</b>	Ciclo de conducción ECE-15.....	70
<b>Figura 7.2</b>	Ciclo de conducción EUDC .....	71
<b>Figura 7.3</b>	Ciclo de conducción EUDCL .....	71
<b>Figura 7.4</b>	Ciclo de conducción NEDC .....	72
<b>Figura 7.5</b>	Ciclo de conducción experimental.....	73
<b>Figura 7.6</b>	Perfil del ciclo de conducción experimental.....	74
<b>Figura 8.2</b>	Barra de comandos de Matlab .....	77
<b>Figura 8.3</b>	Selector de GUI's .....	78
<b>Figura 8.4</b>	Editor de la interfaz.....	78
<b>Figura 8.5</b>	Interfaz principal del proyecto.....	80
<b>Figura 8.6</b>	Interfaz del modelo de batería de Larminie .....	81
<b>Figura 8.7</b>	Parámetros introducidos en la interfaz .....	83
<b>Figura 8.8</b>	Resultado de la simulación.....	85
<b>Figura 8.9</b>	Detalle de la descarga de la batería.....	85
<b>Figura 8.10</b>	Botón de un solo ciclo .....	85

<b>Figura 8.11</b> Gráficas de tensión y corriente .....	86
<b>Figura 8.12</b> Estado de carga respecto a la distancia recorrida en un solo ciclo .....	86
<b>Figura 8.13</b> Botón para representar respecto del tiempo .....	86
<b>Figura 8.14</b> Gráficas de tensión y corriente en un solo ciclo de conducción respecto del tiempo de simulación .....	87
<b>Figura 8.15</b> Estado de carga a lo largo de la simulación de un ciclo de conducción ECE-15.....	87
<b>Figura 8.16</b> Representación del vehículo en Simulink.....	90
<b>Figura 8.17</b> Flujo de los pasos seguidos .....	91
<b>Figura 8.18</b> Interfaz del modelo de Simulink.....	92
<b>Figura 8.19</b> Detalle del ciclo de conducción seleccionado .....	93
<b>Figura 8.20</b> Resultado de la simulación.....	94
<b>Figura 8.21</b> Panel de resultados.....	94
<b>Figura 8.22</b> Descarga de la batería en un ciclo .....	95
<b>Figura 8.23</b> Detalle de la corriente.....	95
<b>Figura 9.1</b> Vehículo Global Electric Motorcars – Caso 1 .....	98
<b>Figura 9.2</b> Caso 1, Resultado método 1. Distancia recorrida: 46Km. ....	99
<b>Figura 9.3</b> Caso 1, Resultado método 2. Distancia recorrida: 43.2Km. ....	99
<b>Figura 9.4</b> Vehículo Beepo Electric – Caso 2 .....	100
<b>Figura 9.5</b> Caso 2, Resultado método 1. Distancia recorrida: 68Km. ....	101
<b>Figura 9.6</b> Caso 2, Resultado método 2. Distancia recorrida: 62.357Km. ....	101
<b>Figura 9.7</b> Vehículo FAAM/EVF SMILE – Caso 3.....	102
<b>Figura 9.8</b> Caso 3, Resultado método 1. Distancia recorrida: 66km.....	103
<b>Figura 9.9</b> Caso 3, Resultado método 2. Distancia recorrida: 64.37Km. ....	103
<b>Figura 9.10</b> Vehículo MELEX – Caso 4.....	104
<b>Figura 9.11</b> Caso 4, Resultado método 1. Distancia recorrida: 70Km. ....	105
<b>Figura 9.12</b> Caso 4, Resultado método 2. Distancia recorrida: 54.3Km. ....	105

#### Lista de tablas

<b>Tabla 4.1</b> Resumen de parámetros de baterías.....	39
<b>Tabla 4.2</b> Parámetros energéticos por tecnología .....	40
<b>Tabla 7.1</b> Datos del ciclo de conducción experimental .....	74
<b>Tabla 8.1</b> Parámetros de un vehículo .....	84
<b>Tabla 9.1</b> Datos vehículo caso 1 .....	98
<b>Tabla 9.2</b> Parámetros de ajuste caso 1 .....	98
<b>Tabla 9.3</b> Datos vehículo caso 2.....	100
<b>Tabla 9.4</b> Parámetros de ajuste caso 2 .....	100
<b>Tabla 9.5</b> Datos vehículo caso 3.....	102
<b>Tabla 9.6</b> Parámetros de ajuste caso 3 .....	102
<b>Tabla 9.7</b> Datos vehículo caso 4.....	104
<b>Tabla 9.8</b> Parámetros de ajuste caso 4 .....	104
<b>Tabla 9.9</b> Resumen de resultados .....	106

## Motivación

Dentro de la asignatura “Sistemas Híbridos” del departamento de Ingeniería Eléctrica surge la idea de llevar a cabo este proyecto con el fin de aplicarlo a tareas de la propia asignatura y como base de desarrollo de futuras aplicaciones. A la hora de prever (ya sea con carácter docente o en el mundo de la investigación) el comportamiento de un sistema, es necesario realizar de manera repetitiva un gran número de operaciones matemáticas hasta obtener el resultado adecuado. La programación de estas tareas facilita poder realizar grandes volúmenes de cálculos de forma rápida y permitiendo cambiar las diferentes constantes utilizadas en el cálculo sin tener que volver a repetir todos los cálculos necesarios uno a uno. Las tareas de programación pueden llevarse a cabo o bien en los diferentes lenguajes de programación existentes (C#, Pascal, Fortran, Visual Basic, etc....) o bien mediante software específico dedicado a tareas matemáticas como es el caso que abarca este proyecto.

La complejidad que conlleva poder programar en cualquiera de estas aplicaciones unida a la falta de conocimientos en programación (o no suficientes según el caso) hacen que un alumno, a la hora de enfrentarse a la utilización de estas herramientas, invierta más tiempo en aprender los conocimientos para su uso que en trabajar en la materia estudiada con los resultados obtenidos. Por esa razón se considera que el desarrollo de este proyecto trata de simplificar la interacción del alumno con software matemático y de simulación sin requerir apenas conocimientos en programación. La mejor forma de aplicar esta interacción es programando un ejemplo de aplicación práctica para el alumno y por eso este proyecto trata de simular el comportamiento de vehículos eléctricos en función de la introducción de los diferentes parámetros constructivos que le caracterizan.

El desarrollo de simulaciones matemáticas es una herramienta muy potente a la hora de llevar a la práctica conocimientos adquiridos de forma teórica en una asignatura pues nos permite ver el posible comportamiento de costosos sistemas desde un ordenador y sin la necesidad de realizar complejos montajes. Para determinadas materias, nos encontramos con limitaciones tanto físicas como económicas de poder realizar prácticas con material real y en el caso de un vehículo eléctrico sería demasiado complejo disponer del mismo para la realización de una sesión de prácticas. Esta es una de las razones de que cada vez se realicen más sesiones de prácticas por medio de software específico en la materia impartida pues permite al alumno centrarse en la búsqueda y correcta interpretación de resultados y no perderse en el aprendizaje de herramientas ajenas a la materia.

El software elegido para desarrollar este proyecto de fin de carrera es MATLAB<sup>®</sup> debido a que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (archivos \*.m) e incorpora la herramienta Simulink para poder llevar a cabo simulaciones de diferentes sistemas. Otra de las herramientas disponibles es un editor de interfaces gráficas, que con la correcta programación, puede interactuar con las aplicaciones disponibles en Matlab.

## Capítulo 1

# Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

En este documento se presenta el desarrollo de la herramienta de simulación de vehículos eléctricos denominada CicloSim. El mundo del vehículo eléctrico es demasiado amplio y se encuentra en constante cambio como para centrarse en un único modelo de vehículo, y es esa razón provoca la necesidad de que la aplicación desarrollada permita dimensionar vehículos de múltiples características según parámetros como son el tipo de batería, su capacidad, número de celdas, masa, dimensiones y demás aspectos constructivos a lo largo de un determinado ciclo de conducción estandarizado. Para ello se realiza un estudio de las aplicaciones existentes en el mercado con funciones similares a las deseadas para ver el alcance de dichas aplicaciones y sus carencias para la aplicación en las tareas necesarias para este proyecto. Adicionalmente se estudiarán las baterías y su funcionamiento como aplicación a vehículos eléctricos. Por otro lado, la parte principal del documento se centrará en el desarrollo de la herramienta de simulación de vehículos eléctricos (CicloSim) que consiste en un programa desarrollado en Matlab y una interfaz de usuario que permite la introducción de las especificaciones de los vehículos por el usuario de la aplicación. Por último se realiza la validación de los resultados obtenidos por medio de simulaciones con datos de vehículos reales (proporcionados por las fichas técnicas de los fabricantes) y comparando la autonomía de dichos vehículos con la obtenida en las simulaciones.

En referencia al desarrollo de la aplicación, la interfaz de usuario se ha desarrollado sobre la plataforma software de MATLAB®, en concreto usando las denominadas herramientas GUI (Graphical User Interface), ya que el programa principal sobre el que se ejecuta toda la aplicación está desarrollado sobre MATLAB. Aunque el programa interno que realiza los cálculos es bastante complejo, la interfaz será sencilla y de uso intuitivo. En general se requerirá que los usuarios posean cierto grado de conocimiento acerca de los valores de los parámetros que intervienen en el comportamiento de un vehículo eléctrico.

## 1.2 Objetivos

En este trabajo se presenta un objetivo principal y varios objetivos secundarios. El objetivo principal es desarrollar una herramienta que permita realizar simulaciones de vehículos eléctricos a batería por medio de una interfaz que controle tanto sistemas previamente programados como complejos modelos previamente creados de Simulink. Dicha herramienta se ha denominado CICLO SIM (simulación de ciclos). Dentro de los objetivos secundarios del documento se pueden distinguir los siguientes puntos:

- Estudio de herramientas similares existentes tanto a nivel académico como a nivel comercial para la simulación de vehículos eléctricos.
- Análisis de las tecnologías presentes en los vehículos eléctricos.
- Implementación de una interfaz que permita la introducción y control de las especificaciones de los vehículos dimensionados por parte de los usuarios.
- Por último, presentación y análisis de los resultados de las simulaciones de vehículos eléctricos.

## 1.3 Fases del desarrollo

Las fases del desarrollo de este proyecto han sido las siguientes:

- Estudio del comportamiento dinámico de vehículos eléctricos.
- Programación en lenguaje propio de Matlab (\*.m) el comportamiento de un vehículo eléctrico y su cálculo de la autonomía.
- Desarrollo de la interfaz GUI (Graphical User Interface) de usuario para el control del programa de diseño de vehículos eléctricos.
- Estudio de modelado y control usando EMR (Energetic Macroscopic Representation).
- Control de modelos de Simulink desde una interfaz.
- Simulación de distintos tipos de vehículos, comparación de resultados con modelos reales.
- Conclusiones

## 1.4 Medios empleados

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado la herramienta software MATLAB®, tanto de la versión estándar que da soporte al programa principal, como de la herramienta GUI (Graphical User Interface) para el desarrollo de la interfaz que sustenta al mencionado programa.



## Capítulo 2

# Herramientas de diseño de vehículos eléctricos

## 2.1 Introducción

Los ingenieros se basan en modelos científicos y pruebas de prototipos para desarrollar sus investigaciones. Los principios científicos (como  $F = ma$ ) ayudan a predecir cómo se comportará un diseño antes de construirlo. De hecho, muchos problemas de diseño son perseguidos por la identificación de los principios que originan el problema, para más adelante, generar y evaluar los posibles diseños a través de técnicas de modelado, antes de construir nada.

Como alumno, a lo largo de la carrera he podido comprobar que en determinadas ocasiones es necesario ver el comportamiento de un objeto físico bajo determinadas condiciones. Para ello la tónica general trataría de aplicar una serie de principios matemáticos específicos al objeto en cuestión para la resolución del problema, pero en algunos casos esto no es posible y es necesaria la utilización de un software adecuado a la materia en estudio.

La forma de tomar contacto con las aplicaciones prácticas de los conocimientos teóricos adquiridos en las clases de teoría es mediante las sesiones llevadas a cabo en los laboratorios de prácticas de las asignaturas correspondientes. En esas sesiones podemos realizar las prácticas correspondientes bien mediante montajes de elementos asociados a la materia estudiada donde realizar las medidas necesarias o bien mediante simulaciones informáticas. Para poder realizar simulaciones informáticas en las que aplicar los conocimientos teóricos adquiridos, por norma general es necesario disponer de un software específico con el que llevar a cabo la aplicación práctica de los contenidos teóricos. Podemos distinguir con claridad dos tipos de software claramente diferenciados que pueden llevar a cabo la aplicación práctica de conocimientos teóricos:

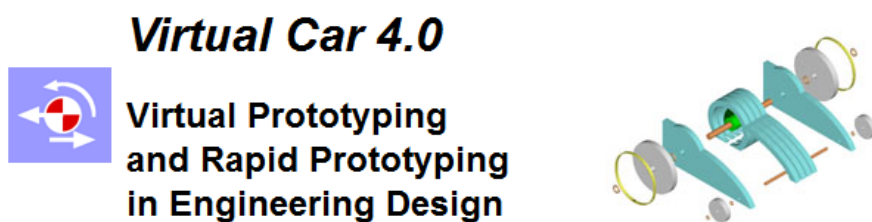
**Software profesional:** Realiza las simulaciones de forma exhaustiva teniendo en cuenta la influencia del máximo de factores posibles en el proceso. Los resultados han sido probados y deben guardar gran igualdad con la realidad. Puede ser usado para dimensionar montajes constructivos de forma previa a una construcción final en el mundo profesional.

Software académico: Es un software que ha sido diseñado específicamente con ese fin, por tanto será utilizado como material de apoyo a docentes, estudiantes y toda aquella persona que desea aprender acerca de determinada área del conocimiento. Permite el acceso al conocimiento académico de una manera más rápida, así como la interacción constante con diversas fuentes de conocimientos. Podemos clasificar los diferentes tipos de software académico en función de los siguientes campos:

- Contenido o materia: según el área de conocimiento: matemáticas, física, etc.
- Destinatario: público objetivo al cual va dirigido.
- Base de datos: puede ser cerrado si va dirigido a un grupo específico de un grupo o abierto si es para cualquier persona.
- Inteligencia: Convencional, experto o bien inteligencia artificial.
- Medios: Como ha sido diseñado, texto, imágenes, videos, etc.

A la hora de afrontar este proyecto se ha realizado un estudio sobre el software disponible en el mercado para poder realizar las simulaciones necesarias sobre vehículos eléctricos y sistemas híbridos y las carencias que estos ofrecen para su aplicación como herramienta docente. Esas carencias son las que motivan la elaboración de este proyecto. A continuación se procede a presentar el software que encontrado dedicado a la simulación de vehículos eléctricos.

## 2.2 Virtual-Car



---

Developed by Michael J. Safoutin  
Instructor of [ENGR 100](#) at the University of Washington

Copyright 2001-2003 Michael J. Safoutin

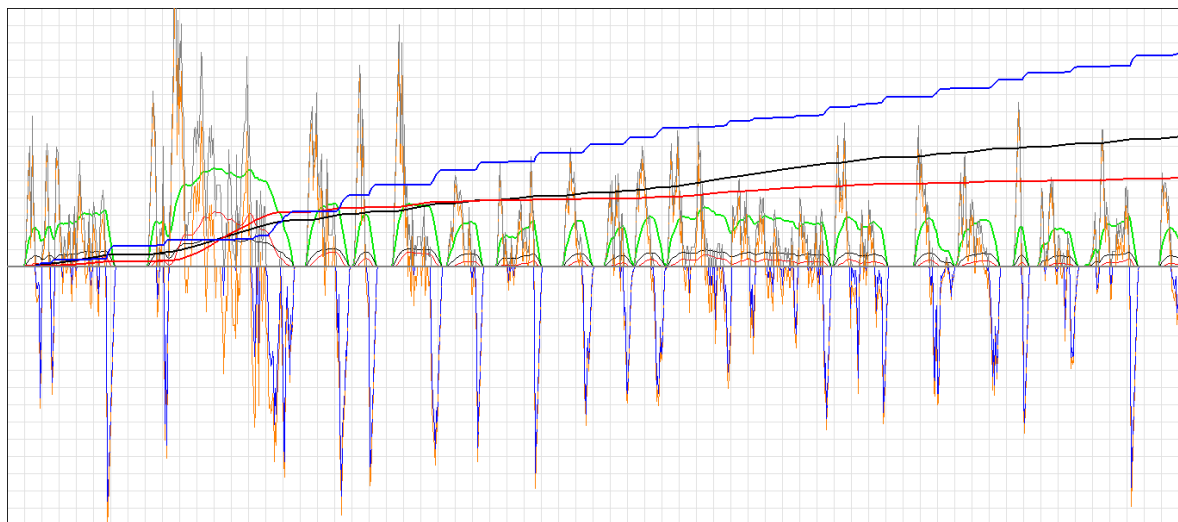
**Figura 2.1** Interfaz del programa Virtual Car

Virtual-Car es un proyecto llevado a cabo en la asignatura ENGR 100 (Introducción al Diseño de Ingeniería) impartida en la Facultad de

Ingeniería de la Universidad de Washington, y fue empleado por su autor, Michael J. Safoutin para la elaboración de su tesis sobre la iteración de diseño y otros aspectos del proceso de diseño de ingeniería.

Si bien el proyecto original Virtual-Car trata de un programa diseñado para ayudar a alumnos a diseñar pequeños coches de juguete con motor de resorte con técnicas de prototipos virtuales y la creación rápida de prototipos para montar, la parte que nos interesa del proyecto es la versión web disponible para simular vehículos convencionales.

Esta herramienta es capaz de calcular en modo online la cantidad de energía necesaria para poder propulsar un vehículo propulsado por combustible que recorre un determinado ciclo de conducción normalizado. Para realizar esta estimación es necesario introducir por teclado una serie de parámetros como son las dimensiones del vehículo, datos del aire, los rendimientos medios del motor, transmisión y el poder calorífico del combustible. Mediante la metodología de modelado implementada por el desarrollador el programa realiza los correspondientes cálculos para hallar diferentes parámetros como velocidad, resistencia de rodadura, resistencia aerodinámica, potencia de frenado y demás parámetros. También se estima que economía de combustible alcanzaría para las eficiencias promedio del sistema de propulsión que usted especifique. También puede especificar una eficiencia de frenado regenerativo si se trata de un vehículo híbrido.



**Figura 2.2** Gráfica de resultados Virtual Car

Todas las variables seleccionables para su cálculo, pueden ser representadas en la correspondiente gráfica como podemos ver en la figura 2.2

## 2.3 iEV

iEV es una aplicación desarrollada para ser usada por teléfonos móviles iPhone que calcula las necesidades energéticas de un vehículo en términos de un coche eléctrico. Su funcionamiento se basa en la adquisición de datos vía GPS a bordo de un vehículo convencional como puede ser cualquiera propulsado por motor de combustión y en función de esos datos, traducirlos a las necesidades de un vehículo eléctrico a tiempo real. Los datos adquiridos son velocidad de conducción, distancia recorrida, modo de conducción y condiciones geográficas. Seleccionando dentro de una base de datos el modelo de vehículo deseado se puede ver como diferentes vehículos necesitan diferentes cantidades de energía para realizar esos trayectos. Por el momento, iEV calcula el tamaño de la batería óptima de un coche eléctrico.



**Figura 2.3** Interfaz iEV

Esta aplicación no puede considerarse de aplicación académica pero la razón de nombrarla en este apartado referente a herramientas de diseño, radica en su utilidad centrada en el vehículo eléctrico.

## 2.4 Conclusión

La razón de llevar a cabo este proyecto viene de no haber encontrado en el mercado una aplicación que ayude al alumno a llevar a cabo simulaciones del comportamiento de vehículos eléctricos y que a su vez le permita interactuar con la programación de la misma. Si bien el proyecto Virtual-Car resuelve parte del problema planteado ante este proyecto de ayudar al alumno a realizar complejas simulaciones de vehículos sin necesidad de programar, no dispone la posibilidad de la simulación de vehículos eléctricos.

La aplicación iEV en cambio si que esta desarrollada específicamente para vehículos eléctricos pero las limitaciones de ser una aplicación desarrollada para dispositivos móviles y de adquisición de datos en movimiento hace que se descarte para llevarse a cabo en un entorno académico.

Además, las aplicaciones encontradas no permiten que el alumno se introduzca en el uso de otras herramientas más genéricas en el mundo de la ingeniería para realizar laboriosas tareas de cálculo y simulaciones como es el entorno proporcionado por Matlab y Simulink.

El conjunto de estas conclusiones es el que motiva a llevar a cabo este proyecto para conseguir desarrollar una aplicación docente que permita:

- Dimensionar un vehículo eléctrico.
- Simular el comportamiento de un vehículo eléctrico.
- Interactuar con Matlab y Simulink.
- Controla modelos de Simulink desde una interfaz.
- Comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos de vehículos reales.
- Ayudar en el desarrollo de las sesiones de prácticas en el departamento de ingeniería eléctrica.

## Capítulo 3

# Introducción al vehículo eléctrico

## 3.1 Vehículo eléctrico

Para empezar a comprender que es en realidad un vehículo eléctrico es posible apoyarse en las definiciones aportadas por el diccionario de la real academia española donde por una parte define al sustantivo “vehículo” como:

*Vehículo: Medio de transporte de personas o cosas*

Por otra parte se puede ver el significado del adjetivo “eléctrico”:

*Eléctrico: Que funciona mediante ella*

A la vista de las definiciones aportadas se comprende que un vehículo eléctrico es un medio de transporte que funciona mediante la electricidad. Pero esta definición abarca una cantidad bastante amplia de diferentes tipos de medios de transporte, pues la definición es válida para trenes, tranvías, coches, autobuses e incluso embarcaciones que dispongan de propulsión eléctrica. Las diferencias entre los diferentes tipos de vehículos no solo radican en la forma y el medio en el que se desplazan sino que también se puede realizar una clasificación según la forma de obtener la energía eléctrica con la que alimentan los motores:

- Fuente externa: Trenes eléctricos
- Energía generada a bordo: Embarcaciones nucleares
- Energías renovables: vehículos solares
- Reacción química a bordo: vehículos a baterías o pilas de combustible.

En el caso que se abarca en este proyecto se centrará en vehículos eléctricos de tipo turismo y similares por considerar que dentro del amplio espectro de vehículos eléctricos disponible, son los más cercanos al público en general y resulta más sencillo realizar comparaciones con modelos similares de vehículos con motores de combustión interna.

## 3.2 Historia del vehículo eléctrico

Antes de comenzar a desarrollar los diferentes aspectos que forman este proyecto se considera que es necesario hacer un repaso a la historia del vehículo eléctrico para de esa forma llegar a comprender mejor las razones por las cuales se eligen diferentes tecnologías en la actualidad a la hora del diseño del propio vehículo. Por esa razón, en este apartado se realizará un breve repaso a la historia del vehículo eléctrico y los principales hitos alcanzados.

Al hablar de la historia de la automoción se tiende a pensar en vehículos propulsados por motores de combustión, pero repasando los casi dos siglos de historia desde los primeros vehículos autopropulsados a vapor hasta nuestros días, nos encontramos con que ha habido vehículos eléctricos que han ido apareciendo de forma intermitente.

Los primeros modelos de vehículos eléctricos que aparecieron (en los años 30 del siglo XIX Robert Anderson, inventó el primer vehículo eléctrico puro) son anteriores a la aparición del motor de combustión interna. Estos prototipos eran propulsados por baterías no recargables.

En la segunda mitad del siglo XIX el desarrollo de las baterías recargables propició de nuevo la aparición de nuevos modelos de vehículos eléctricos. Una continua investigación en el desarrollo de este tipo de vehículos propicia que a finales de siglo se consigan logros como superar la barrera de los 100 km/h lograda por el belga Camile Jenatzy en 1899 (llegando incluso a los 105.88 km/h).



**Figura 3.1** Vehículo eléctrico de primeros del siglo XX



El gran crecimiento de la industria automovilística dejó de lado el desarrollo de vehículos eléctricos en masa de tal forma que a finales de 1930, la industria del automóvil eléctrico desapareció por completo, quedando relegada a algunas aplicaciones industriales muy concretas, como transportadores de mercancías y toros elevadores de batería eléctrica. No obstante continuaron apareciendo modelos de vehículos eléctricos de forma esporádica incluso combinando nuevas tecnologías como el uso de baterías de células fotoeléctricas, fabricado por una empresa norteamericana en 1960, con un panel formado por 10.640 células y situado en el techo capaz de producir en 10 horas de exposición la energía necesaria para 1 hora de marcha.

La dependencia del petróleo creada con el auge de los vehículos a motor de combustión provoca que en épocas de crisis se produzca un aumento del precio de los combustibles y es en estos momentos cuando vuelve a aparecer la necesidad de desarrollar vehículos eléctricos que no dependan de materias primas de origen extranjero sensibles a la estabilidad política global. Prueba de ello fue la crisis del petróleo en los años setenta donde la compañía Sebring-Vanguard empezó la producción del que se considera el primer coche eléctrico producido en masa, el CitiCar, un pequeño utilitario equipado con ocho baterías de plomo y ácido de 6V que tenía una autonomía de 60 km y una velocidad máxima de 50 km/h llegando a construirse cerca de 2.000 unidades entre 1974 y 1977.

General Motors empezó en 1990 un ambicioso programa de desarrollo del coche eléctrico basado en el prototipo GM Impact, presentado ese mismo año en el Los Ángeles Auto Show. Este proyecto llevó a cabo la producción de alrededor de 1.000 unidades entre 1996 y 1998 del coche eléctrico General Motors EV1. En 1998 el proyecto experimentó un tremendo fracaso cuando General Motors abandonó el desarrollo del GM EV1, que se suponía que debería haber revolucionado el mercado americano

En el intento de conseguir revolucionar el mercado Toyota presenta en el año 1998 su popular modelo híbrido, el Toyota Prius. Se puede considerar la aparición del Prius como un éxito comercial pues hoy en día sigue manteniéndose en lo más alto gracias a las prestaciones que ofrece y a su bajo consumo. Tras el éxito del Prius, las demás marcas se han ido apresurando a sacar sus diferentes modelos híbridos para intentar hacerse un hueco en el mercado que ha protagonizado el modelo de Toyota.

Las nuevas baterías de iones de litio son más estables y por consiguiente más seguras. No tienen efecto memoria y han conseguido estirar la autonomía del



coche eléctrico en un rango que va desde los 150 hasta los 300 km, dependiendo del modelo. Los primeros coches de producción equipados con baterías de ión-litio en llegar al mercado, en 2010, fueron el Citroën C-Zero y el Peugeot iOn, además del Nissan Leaf, elegido como Coche del Año en Europa 2011. La alianza Nissan-Renault, que ha invertido cuatro mil millones de euros en su proyecto de desarrollo del coche eléctrico se está preparando para lanzar al mercado cuatro modelos eléctricos de Renault: el Renault Fluence Z.E., Renault Kangoo Express Z.E. y el cuadriciclo eléctrico Renault Twizy.

Es un momento en que la capacidad de suministro de las empresas productoras de componentes y la competencia entre los fabricantes llegan a niveles nunca vistos y las apuestas a favor del coche eléctrico están muy por encima de como nunca han estado.

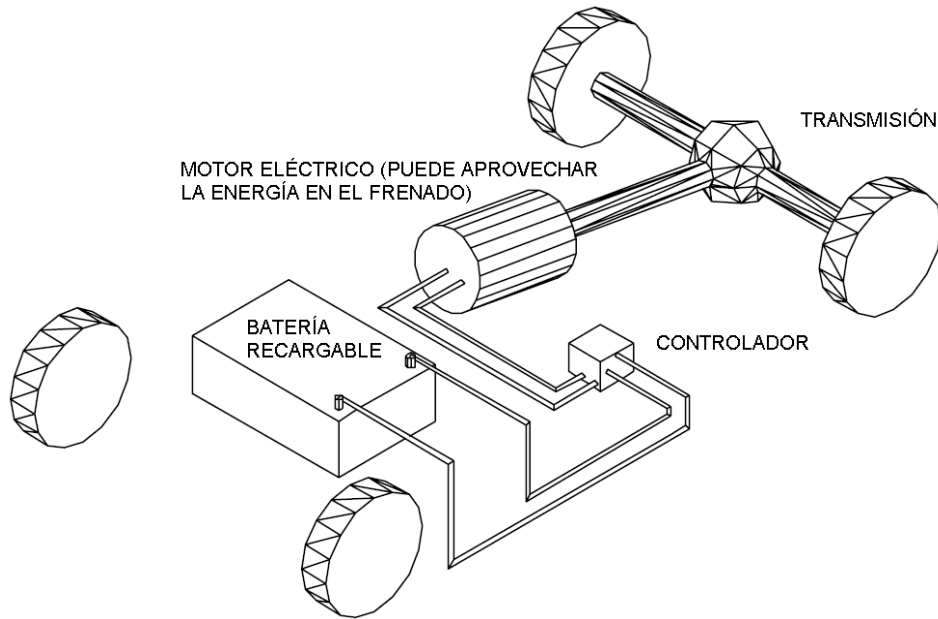
### 3.3 Tipos de vehículos eléctricos

Cuando nos referimos a vehículos eléctricos estamos haciendo referencia a cualquier automóvil que utiliza un motor eléctrico para propulsar el vehículo independientemente de la fuente de energía utilizada. En función de la fuente de energía que proporciona la alimentación necesaria al motor se puede realizar la siguiente clasificación:

- Vehículo eléctrico puro.
- Vehículo con pila de combustible.
- Vehículo híbrido en serie.
- Vehículo híbrido en paralelo.

#### 3.3.1 Vehículo eléctrico puro.

Propulsados exclusivamente por uno o varios motores eléctricos. La fuente de energía a bordo es la batería. La recarga de las baterías se realiza desde la red o cambiando las mismas



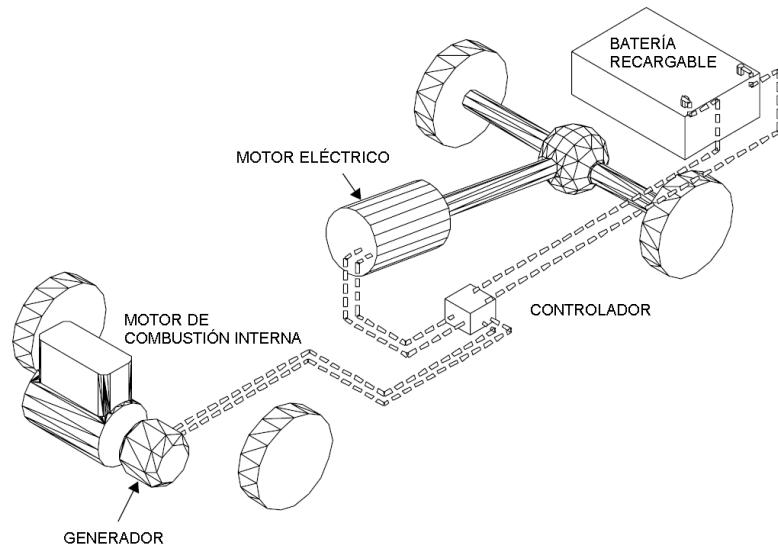
**Figura 3.2** Esquema vehículo eléctrico puro

### 3.3.2 Vehículo con pila de combustible.

Vehículo con motor eléctrico cuya energía la proporciona una reacción química en una pila de combustible. El esquema del vehículo es el mismo que el caso anterior con la diferencia de que no hay batería sino una pila de hidrógeno. En el caso de los vehículos con pila de combustible no es posible volver a almacenar la energía recuperada en el frenado regenerativo en la pila de combustible.

### 3.3.3 Vehículo híbrido en serie.

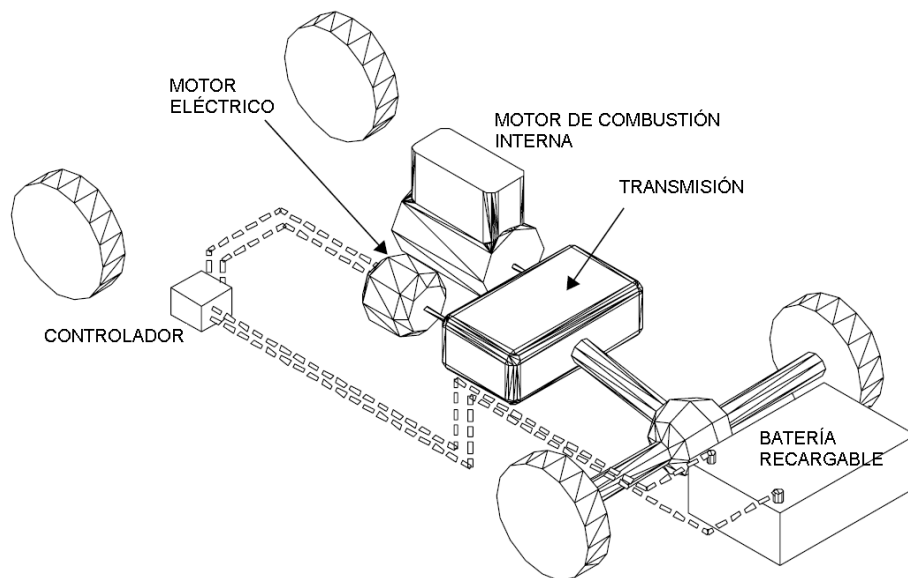
Vehículos cuya propulsión es exclusivamente eléctrica y cuyas baterías son cargadas o bien desde la red o bien a través de un pequeño motor de explosión que gira a régimen constante.



**Figura 3.3** Esquema vehículo híbrido serie

#### 3.3.4 Vehículo híbrido en paralelo.

Combinan un motor térmico de tamaño medio/grande con un motor eléctrico de apoyo para aceleraciones y arrancadas. El vehículo puede funcionar indistintamente con uno, con otro, o con ambos a la vez.



**Figura 3.4** Esquema vehículo híbrido paralelo

## Capítulo 4

# Baterías

### 4.1 Introducción

A lo largo de este proyecto se va a ver el comportamiento de vehículos eléctricos en función de las condiciones y determinados aspectos constructivos y como se verá más adelante, el principal elemento que determina la autonomía de un vehículo eléctrico es la batería. Por esa razón se considera oportuno que uno de los capítulos de este proyecto se dedique a los diferentes tipos de baterías existentes para comprender mejor su comportamiento y poder decidir a la hora de dimensionar un vehículo cual es la solución más adecuada al problema que tengamos planteado.

Las baterías permiten disponer de energía eléctrica en cualquier momento de forma independiente al momento en que se haya generado. Existe una necesidad de poder generar o transportar enormes cantidades de energía eléctrica dentro del propio vehículo. La generación de energía eléctrica a través de una pila de combustible de hidrógeno, se presenta como una posible solución a bastante largo plazo pues aparte de los problemas de almacenar hidrógeno de forma eficaz y segura, la falta de modelos comerciales de vehículos en el mercado hace que no sea útil modelar una pila de hidrógeno en nuestro proyecto pues no podremos comprobar su comportamiento como si que podremos ver más adelante con los modelos comercializados que usan baterías de plomo-ácido.

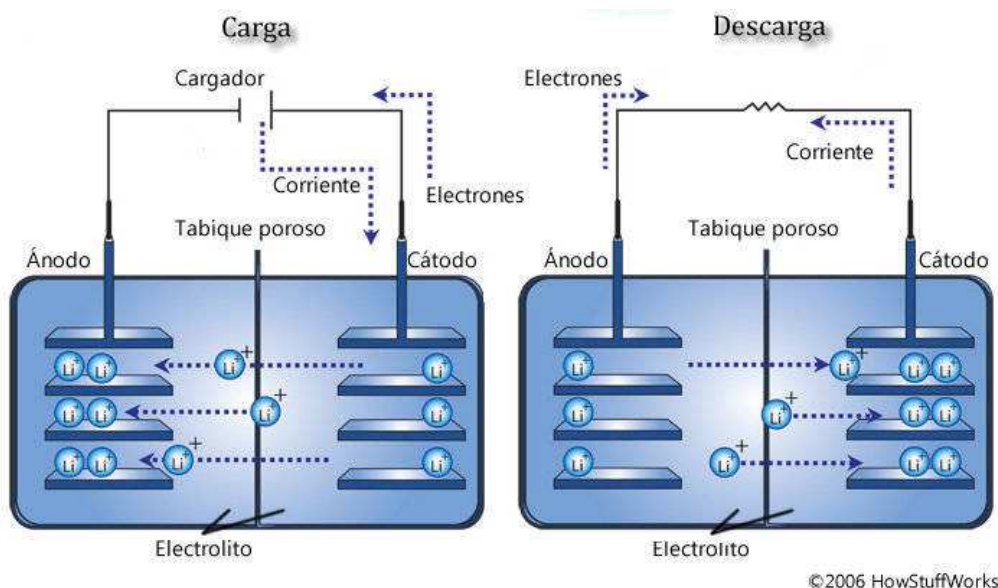
Las baterías son el elemento fundamental en el diseño de vehículos híbridos y eléctricos. En ellas está la clave de su viabilidad técnica y económica, el principal problema y, por tanto, también el mayor desafío tecnológico dentro de esta opción de transporte motriz que parece condenada a conquistar el mundo a cámara lenta. Las baterías constituyen ya el presente y tal vez el futuro del coche eléctrico, por lo que es fundamental empezar a conocerlas con detalle

## 4.2 Fundamentos básicos de una batería

Una batería recargable se puede definir como un dispositivo acumulador de capaz de almacenar energía eléctrica mediante reacciones electroquímicas de reducción/oxidación.

La unidad básica de una batería es la celda electroquímica, también denominada elemento; de tal manera que una batería está formada por dos o más elementos. Para aumentar el voltaje y/o la capacidad del acumulador, estos elementos se conectan en serie, en paralelo o en una combinación de ambas formas. Las celdas electroquímicas están formadas por dos electrodos separados por un electrolito. En general, los electrodos son materiales compuestos (“composite”) formados por:

- El material electroquímicamente activo.
  - Un conductor electrónico encargado de asegurar la transferencia de electrones al material activo y desde el mismo.
  - Un polímero que mejora las propiedades mecánicas del electrodo “composite”.
- En el electrodo negativo se dispone el material activo con menor potencial red-ox y en el electrodo positivo el compuesto con mayor potencial.



**Figura 4.1** Esquema funcionamiento batería

Empezando con lo básico, una batería es un conjunto de celdas, en cada una de las cuales tiene lugar una reacción química reversible en la que se produce un intercambio de iones y electrones entre sus dos polos. En la “dirección de descarga”, se produce una corriente eléctrica que es capaz de mover el motor eléctrico que impulsa el coche, mientras que en la “dirección de recarga” iones

y electrones vuelven a su situación original a partir de un aporte de energía externo.

Las dos características fundamentales, que determinan el comportamiento, rendimiento y duración de una batería son, por un lado, los elementos químicos escogidos para dar lugar a la reacción dentro de cada célula y, por otro, la electrónica que controla todo el proceso de descarga y recarga. Las celdas de la batería son su parte esencial, determinando su coste y rendimiento, de forma que la mayoría de los esfuerzos investigadores se encuentran actualmente dirigidos a mejorar este elemento clave. Cada célula consta de un cátodo (electrodo positivo) un ánodo (electrodo negativo) y un electrolito, que separa ambos electrodos y constituye el medio neutral para la transferencia de carga dentro de la célula.

Antes de entrar en las diferentes químicas posibles, cabe decir que las células pueden adoptar forma prismática, cilíndrica o de plancha, aportando diferentes ventajas e inconvenientes en cuanto a densidad energética, disipación del calor y aprovechamiento del espacio, que las convierten en más o menos adecuadas para los diferentes usos.

## 4.3 Parámetros electroquímicos de las baterías recargables

Las prestaciones de una batería van a depender en gran medida de las características que tengan las celdas o elementos utilizados para su fabricación. Los parámetros electroquímicos más ampliamente utilizados para caracterizar una celda o una batería son:

Fuerza electromotriz, tensión, voltaje o potencial (E).

El voltaje de una celda electroquímica viene dado por la diferencia entre los potenciales red-ox de los materiales activos del cátodo y del ánodo. Es muy importante disponer de celdas con alto potencial, ya que permiten disminuir el número de elementos que se deben conectar en serie para aumentar el voltaje nominal de la batería. La fuerza electromotriz de las celdas y las baterías se mide en voltios.

Capacidad específica (C).

La capacidad es el parámetro que indica la cantidad total de carga eléctrica que es capaz de almacenar la batería. La unidad comúnmente utilizada para

expresar la capacidad es el amperio-hora (Ah). Cuando se comparan diferentes tecnologías de baterías, es muy útil normalizar el valor de la capacidad a la masa total (Ahkg) o al volumen total (Ahl) de la batería. Ambas normalizaciones son significativas, ya que tanto el peso como el volumen total de la batería son dos magnitudes que es importante reducir para una óptima aplicación de la batería en el dimensionamiento de vehículos eléctricos.

Energía específica (W).

La energía específica indica la cantidad total de energía eléctrica que se puede almacenar en la batería. Este parámetro electroquímico es muy importante ya que reúne a los dos anteriormente indicados. Así, la energía específica másica de una batería se calcula como:

$$W_m = E Q / \text{peso de la batería.} \quad (4.1)$$

La energía específica volumétrica, también denominada densidad de energía, se determina a partir de la expresión

$$W = E Q / \text{volumen de la batería.} \quad (4.2)$$

Las unidades utilizadas para ambas energías son Whkg y Whl, respectivamente.

Ciclos de vida.

Los ciclos de vida de una batería son el número de ciclos de carga/descarga que se pueden llevar a cabo hasta que la capacidad de la batería sea el 80% de su valor nominal. Es altamente recomendable que las baterías tengan más de 500 ciclos de vida si han de ser usadas en vehículos eléctricos.

Conviene mencionar que a la hora de decidir cuál de las tecnologías de baterías es la más idónea para su utilización en vehículos eléctricos o híbridos, aspectos tales como un bajo impacto medioambiental o que las baterías sean fácilmente reciclables, juegan un papel cada vez más determinante. Por último, disponer de baterías con un precio bajo o moderado, es otro parámetro muy importante a la hora de tomar una decisión.

Profundidad de descarga (Dod)

Este término aparece en muchas ocasiones en su forma inglesa (depth of discharge) y de ahí que se exprese con sus siglas “Dod”. La profundidad de descarga representa la cantidad de energía que puede extraerse de una *batería*. Este valor está dado en forma porcentual. Para comprender de mejor

manera la profundidad de descarga y su relación con la capacidad vista anteriormente podemos ver un simple ejemplo:

Supongamos una batería de 24V y con una capacidad de 800Ah. La máxima corriente de carga será de  $C/5=160A$ . Así, podremos cargar 320A en dos horas. Si simultáneamente hay un consumo de 15A, el cargador deberá producir 175Ah. Durante las restantes 22 horas de un periodo de carga de 24h podremos usar una media de  $320Ah/22h=14,5A$ , lo que significa una descarga de sólo  $320/800=40\%$ . Aunque esta cantidad no parezca elevada, es el máximo alcanzable cuando el tiempo de uso del generador está limitado a 2 horas. Si se usa de esta manera, el periodo cíclico se estabilizará entorno a un DoD\* del 20% (a partir de este punto, el voltaje de carga aumenta y la corriente aceptada por la batería disminuye) y el DoD del  $20\%+40\%=60\%$ . Descargas más profundas y cargas más rápidas darán lugar a una considerable pérdida de la vida útil. En este ejemplo, la batería está siendo usada en un estado parcial de carga (entre el 20 y el 60% de DoD).

#### Celdas

Elemento clave de la batería y cada uno de las células donde tiene lugar la reacción. Las posibles configuraciones a la hora de conectar las celdas hacen que aumente la tensión del conjunto (acoplando celdas en serie) o la capacidad (o acoplando celdas en paralelo).

#### Polaridad

En el proceso electrolítico cada uno de los electrodos toma una polaridad diferente. La batería tiene entonces un terminal negativo y otro positivo, los que están claramente identificados en la caja de plástico con los símbolos correspondientes (- y +).

## 4.4 Tipos de baterías

Dentro del amplio espectro de vehículos que se pueden encontrar en el mercado se pueden observar un amplio el espectro de baterías usadas para su propulsión. Para poder realizar una clasificación de todas ellas se atenderá a sus diferentes químicas usadas en su diseño. Existen tres tipologías de baterías, atendiendo a su química, cuyo desarrollo actual las hace adecuadas para alimentar el motor de un coche eléctrico: las baterías de Plomo-Ácido, las baterías de Metal-Níquel y, finalmente, las baterías de Ion-Litio.



Escoger entre los diferentes tipos de baterías es siempre una decisión de compromiso entre densidad energética, potencia específica, costes, seguridad y durabilidad.

#### 4.4.1 Plomo-Ácido

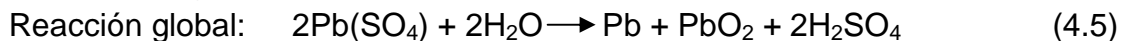
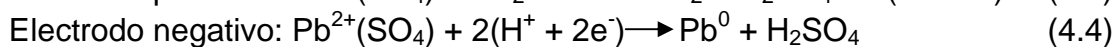
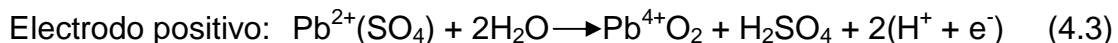
Desde 1960, se han introducido numerosas mejoras en este tipo de acumuladores. Estas mejoras incluyen aspectos muy diferentes, tales como:

- el método de preparación del material activo de electrodo
- la composición y/o la geometría de los colectores de corriente
- la disposición de los electrodos en cada uno de los elementos

En la actualidad, el diseño más avanzado se corresponde con las denominadas "spiral wound valve-regulated lead-acid (VRLA) batteries" cuya principal novedad consiste en que se ha abandonado la disposición tradicional de electrodos en placas paralelas con el conjunto separador-electrolito entre ellas, por una nueva geometría en la cual los tres componentes están enrollados en espiral. Curiosamente, después de casi 150 años de desarrollo, esta nueva geometría recuerda mucho a la utilizada por Plante en su primera batería de Pb-ácido. Con esta nueva geometría, se aumenta notablemente la potencia que es capaz de suministrar el acumulador. También se incrementa el número de ciclos que se pueden realizar para descargas profundas; es decir, cuando la capacidad suministrada por la batería se aproxima a su valor nominal.

#### Reacciones electroquímicas

Las reacciones reversibles que tienen lugar en cada uno de los elementos de una batería de Pb-ácido durante las etapas de carga/descarga son:



Antes de pasar a describir las reacciones electroquímicas, conviene indicar que en las tres tecnologías que se revisan en este capítulo, los materiales activos de electrodo que se utilizan para la fabricación de la batería se corresponden con los compuestos que se forman cuando ésta está descargada; por ejemplo, en este caso, es el sulfato de plomo, PbSO. Por esta razón, las baterías se deben cargar antes de ser utilizadas. Durante la etapa inicial de carga, en el electrodo positivo se produce la oxidación del Pb del sulfato de plomo (PbSO) a dióxido de plomo (Pb) con cesión de dos electrones. Estos electrones, en el electrodo negativo, reducen el Pb del sulfato de plomo a plomo metálico (Pb). Al final de esta etapa de carga se han formado in situ dentro de cada celda,

PbO y Pb metálico. Estos dos compuestos son los auténticos materiales electroquímicamente activos de la batería de Pb-ácido. Respecto al electrolito, éste es una disolución acuosa de ácido sulfúrico al 37% en peso. Durante la etapa de descarga, es decir, durante el funcionamiento de la batería, en el ánodo se produce espontáneamente la oxidación del plomo metálico a Pb, con cesión de dos electrones. Este catión, en presencia de los iones sulfato del electrolito precipita inmediatamente sobre el electrodo formándose el sulfato de plomo, (PbSO) inicial. Los electrones, tras suministrar energía eléctrica a la aplicación, reducen el PbO del cátodo a Pb. Al igual que en el ánodo, se produce la rápida precipitación del sulfato de plomo en el electrodo. El voltaje nominal de las baterías de Pb-ácido es de 2,0 V. Su energía específica teórica es de 83 Whkg, sin embargo, las baterías de Pb-ácido comerciales presentan bajos valores de energía entre 10 y 40 Whkg.

Las principales ventajas de las baterías de Pb-ácido son:

- Elevado voltaje. Dentro de los acumuladores electroquímicos basados en electrolitos acuosos, son los que tienen un mayor voltaje nominal,  $E = 2,0 \text{ V}$ .
- Elevada potencia. Las baterías de Pb-ácido son capaces de suministrar una elevada intensidad de corriente y, por tanto, alta potencia. Esta propiedad se justifica por la rápida cinética de reacción en los electrodos de estas baterías. En VEBs esta propiedad es muy útil durante los periodos de aceleración del vehículo.
- Tecnología fácil de implementar. La fabricación de baterías de Pb-ácido se ve facilitada debido a que: la pasta inicial de PbOHSO utilizada para la fabricación de ambos electrodos, cátodo y ánodo, es la misma, la conductividad eléctrica de los materiales activos de los electrodos (Pb, PbO) es elevada, por ello no es necesario añadir ningún componente adicional para mejorar la respuesta eléctrica de los electrodos, los colectores de corriente y las conexiones eléctricas entre los elementos de la batería están realizados en plomo y en la actualidad, las fábricas de baterías de Pb-ácido han alcanzado un considerable grado de automatización.
- Bajo coste. Sin duda, la principal ventaja de las baterías de Pb-ácido es su bajo precio (100-125 \$/kWh). Actualmente, es la tecnología de acumuladores electroquímicos más barata del mercado y difícilmente va a dejar de serlo.
- Tecnología madura. La tecnología de las baterías de Pb-ácido, después de 150 años de desarrollo, es muy conocida y está contrastada.
- Componentes fácilmente reciclables. La tecnología para reciclar los componentes de las baterías de Pb-ácido está altamente desarrollada. Así, en España, se reciclan más del 95% de todas las baterías utilizadas.

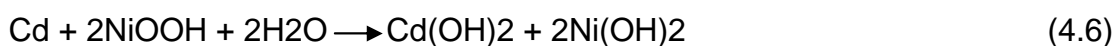
En referencia a las limitaciones de las baterías de Pb-ácido, las más importantes son:

- Baja energía específica. De las tres tecnologías de acumuladores analizadas en este capítulo, las baterías de Pb-ácido son las que tienen menor energía específica (10-40 Wh/kg). Estos bajos valores son consecuencia del elevado peso de los compuestos de plomo que se utilizan en estas baterías.
- Moderada ciclabilidad. Cuando se hacen descargas profundas, es decir, cuando se utiliza la mayor parte de la capacidad de la batería, el número de ciclos de carga/descarga que pueden realizar las baterías de Pb-ácido es moderado, típicamente entre 400 y 800 ciclos. Esta limitación reduce la vida media de estas baterías cuando se utilizan en VEs.
- Desprendimiento de gases. Durante la etapa de carga de la batería se puede formar hidrógeno y oxígeno en los electrodos. El desprendimiento de hidrógeno entraña riesgo, ya que éste es un gas inflamable.
- Fuerte impacto medioambiental. Además del fuerte carácter contaminante de los compuestos de plomo, algunas configuraciones de baterías de Pb-ácido incluyen antimonio y arsénico como componentes de la rejilla del colector de corriente. Estos elementos pueden dar lugar a estibina y arsina, compuestos de alta toxicidad.

#### 4.4.2 Baterías de base Níquel

Existen varios tipos de baterías de base níquel: níquel-hidruro metálico (Ni-MH), níquel-cadmio.

(Ni-Cd), níquel-hierro o níquel-zinc; sin embargo las 2 últimas apenas se utilizan, por lo que solo son viables las de Ni-MH y las de Ni-Cd. Las baterías Ni-Cd fueron consideradas como una gran alternativa a las baterías de plomo ácido, ya que su energía específica es aproximadamente el doble. Usan oxihidróxido de níquel en el electrodo positivo y cadmio metálico en el negativo. La reacción global es la siguiente:



Sus ventajas son su alto poder específico, alto número de ciclos de vida, capacidad para trabajar en un amplio rango de temperaturas y buen almacenaje a largo plazo; por contra, el voltaje por célula es aproximadamente un 50-60% del voltaje por célula de la batería de plomo ácido, además el cadmio es mucho más caro que el plomo, cancerígeno y dañino para el medio

ambiente, motivos que están provocando que estas baterías caigan en desuso. A partir de la década de los 90 del siglo XX, empezó a introducirse la técnica del hidruro metálico. Las baterías de Ni-MH tienen un funcionamiento similar a las de Ni-Cd pero cuentan con la ventaja de que en el electrodo negativo se usa hidrógeno en forma de hidruro metálico, con lo que se elimina la utilización del cadmio. El funcionamiento de este electrodo negativo es igual que el de una pila de combustible. La reacción global es:



Sus propiedades son o bien iguales o bien un poco superiores a las de las baterías de Ni-Cd, destacando sobretudo que se puede cargar mucho más rápido; sin embargo, su capacidad de auto-descarga es mucho mayor. Están consideradas como una de las mejores opciones de futuro.

Las baterías de níquel-hidruro metálico (baterías NiHM) se consideran la evolución de las baterías alcalinas de níquel-cadmio. Ambas tecnologías tienen en común el material activo de cátodo (oxihidróxido de níquel, NiOOH) y el electrolito (hidróxido potásico, KOH). El aspecto más novedoso de las baterías de NiHM es la sustitución del electrodo negativo de cadmio por una aleación metálica capaz de insertar hidrogeno electroquímicamente y de manera reversible.

#### 4.4.3 Litio

En las décadas de los setenta y ochenta, las investigaciones desarrolladas en laboratorios de EEUU, Japón y Europa demostraron que era posible insertar y desinsertar iones litio en/desde distintos compuestos químicos. Fruto de estos trabajos pioneros, en el año 1991, la empresa japonesa Sony comercializó la primera batería de ión-litio (batería ion-Li).

Últimamente, parece darse por sentado que las baterías ion-Li son las más adecuadas para el uso automovilístico, y posiblemente sea así. No obstante, no es esta la única posibilidad que existe y, de hecho, las propias baterías de ion-Li constituyen una amplia familia de opciones químicas diversas que sólo comparten entre sí el Litio como elemento fundamental, pero no el resto de elementos implicados.

##### Ventajas y limitaciones

Las baterías de ión-litio son la tecnología más avanzada en acumuladores electroquímicos gracias a las siguientes ventajas:

- Alto voltaje. Las baterías ion-Li poseen el mayor voltaje nominal, con valores típicos entre 3 y 4 V (Fig. 6.4a). El uso de un electrolito no acuoso permite alcanzar estos elevados valores del potencial, que pueden llegar a ser hasta tres veces superiores a los mostrados por las baterías de NiHM.
- Elevada energía específica. De las tres tecnologías de baterías que se utilizan en los VEBs y VEHs comerciales, las baterías ion-Li son las que presentan los mayores valores de energía específica, tanto másica (80-170 Wh/kg) como volumétrica (170-450 Wh/l). Estos valores de energía eléctrica almacenada son casi el doble de los de las baterías de NiHM y más de cuatro veces el valor de los acumuladores de Pb-ácido.
- Elevado número de ciclos de vida. Las diferentes configuraciones de baterías ion-Li comerciales, así como gran parte de las nuevas configuraciones en desarrollo, presentan una excelente recargabilidad.

En referencia a las limitaciones más significativas que presentan las actuales baterías ion-Li, éstas son:

- Elevado coste. El coste de las baterías ion-Li es elevado, pudiendo llegar hasta 800 €/kWh. Sin embargo, se espera que este precio se reduzca de una manera significativa con el aumento de la demanda y la introducción de nuevos materiales catódicos.
- Pérdida de prestaciones a alta temperatura. Muchas de las configuraciones de baterías ion-Li comerciales muestran una disminución significativa de sus propiedades electroquímicas cuando éstas trabajan a temperaturas superiores a 50 °C.
- Baja tolerancia al abuso. Las baterías ion-Li se degradan cuando se someten a condiciones de abuso, es decir, cuando se sobre descargan o se sobrecargan. Así, cuando una batería ion-Li se descarga por debajo de 2 V, ésta se degrada rápidamente. Igualmente, cuando se somete a sobrecarga se produce pérdida de capacidad de la batería. También puede sufrir procesos de calentamiento descontrolado ("thermal runaway"), que en casos extremos, puede provocar el incendio de la batería.

## 4.5 Conclusión

Las baterías de Plomo-Ácido son la opción de bajo coste, y se han utilizado durante décadas para arrancar nuestros motores de combustión. Entre sus ventajas, además del bajo coste y estandarización universal, se encuentran su buena potencia específica (W/kg), buen comportamiento en un amplio rango de temperaturas, buena retención de la carga en el tiempo y son relativamente

fáciles de reciclar. Sólo pueden almacenar unos 40 Wh/kg, una densidad energética muy pobre como veremos más adelante.

Las baterías de Níquel-Metal han sido las preferidas por el archiconocido Toyota Prius durante sus más de 10 años de historia, por lo que han demostrado sobradamente su capacidad para responder con solidez en las entrañas de un híbrido no enchufable. Su potencia específica es correcta, su ciclo de vida largo y no presentan problemas medioambientales, mientras que tienen un alto índice de descarga en periodos de inactividad (pierden el 30% de la carga en un mes paradas) y su coste de producción es algo elevado por incorporar tierras raras en el electrodo positivo. Sus 60 Wh/kg las hace superiores a las de Plomo-Ácido, pero las mantiene todavía cierta distancia del Litio, que, no en vano, es el más ligero de los elementos de la tabla periódica que no es un gas a temperatura ambiente.

Su voltaje, densidad energética, potencia específica, carga utilizable, eficiencia de recarga y ciclo de vida son muy superiores a las de sus dos rivales, al tiempo que su índice de descarga es mucho menor

Las baterías ion-Li, de las que existen muchas variedades, parecen estar llamadas a prevalecer, pues sus características técnicas más importantes mejoran sustancialmente a las dos opciones anteriores, si bien introducen también algún que otro problema en la ecuación. Su voltaje, densidad energética, potencia específica, carga utilizable, eficiencia de recarga y ciclo de vida son muy superiores a las de sus dos rivales, al tiempo que su índice de descarga es mucho menor.

Como inconveniente, cabe señalar su menor robustez ante variaciones de voltaje, que obliga a incorporar costosos sistemas de gestión de las baterías para su protección y correcto funcionamiento. De ello y de su propia composición química se deriva un coste de producción también mayor que sus rivales, tema a tener muy en cuenta dada su extrema relevancia en la competitividad del coche eléctrico.

Las tres tecnologías de acumuladores que están siendo utilizadas actualmente en los VEBs y VEHs comerciales son las baterías de plomo-ácido, níquel-hidruro metálico e ión-litio.

Las baterías de plomo-ácido tienen las más bajas prestaciones electroquímicas y su impacto medioambiental es importante, aunque éste se puede reducir, gracias al eficiente reciclado de estas baterías. Sin duda, su principal ventaja radica en su bajo precio que difícilmente va a ser alcanzado por otras tecnologías de acumuladores. Esta característica justifica que las baterías de Pb-ácido se estén utilizando actualmente en VEBs con autonomía reducida y bajas

velocidades de circulación como el Reva-i. Es probable que los acumuladores de plomo puedan tener aplicación en futuros VEBs en los que su bajo precio constituya su principal aliciente. Las baterías de níquel-hidruro metálico, con unas prestaciones electroquímicas superiores a las baterías de Pb-ácido, han sido las elegidas para impulsar el pequeño motor eléctrico de los actuales VEHs comerciales. Sin embargo, el fuerte desarrollo de las baterías ion-Li hace presagiar que, al igual que ya ocurrió con los equipos electrónicos portátiles, esta tecnología sustituya a las baterías de NiHM en los futuros VEHs, en especial, en los vehículos híbridos enchufables que contarán con un motor eléctrico más potente y una mayor autonomía en modo eléctrico. Incluso actualmente, las baterías ion-Li han sido las elegidas para los VEBs de altas prestaciones, como el deportivo Tesla Roadster. Dadas sus notables prestaciones electroquímicas, existe ya consenso en afirmar que las baterías ion-Li son las mejor situadas para suministrar la energía eléctrica a las próximas generaciones de EVBs, los cuales serán ya asequibles al gran público.

A pesar de sus altas prestaciones, para que los VEBs puedan seguir evolucionando, es prioritario seguir mejorando las baterías ion-Li. Por ello, es necesario: aumentar la energía almacenada en las baterías, aumentar su vida media, reducir el coste y desarrollar baterías respetuosas con el medio ambiente.

Centrándose en este proyecto, como se verá más adelante (capítulo 5) para modelar el comportamiento de una batería utilizaremos una serie de parámetros presentes en estos tres tipos de baterías para definirlos. Estos parámetros son:

- Tensión de celda
- Profundidad de descarga máxima
- Capacidad

<b>Tipo</b>	<b>V<sub>celda</sub> (voltios)</b>	<b>Profundidad de descarga Máxima (%)</b>	<b>Ciclos de carga</b>	<b>Energía específica (Wh/kg)</b>
<b>Plomo- Ácido</b>	2-2.15	20-80 (ciclo profundo)	500- 1000	35
<b>NiCd</b>	1.2	20-50	2000	55-60
<b>Ión-Li</b>	3.7	80	1000	100

**Tabla 4.1** Resumen de parámetros de baterías



<b>Batería</b>	<b>Plomo-Ácido</b>	<b>NiCd</b>	<b>Ni-Mh</b>	<b>ión-Li</b>
<b>V<sub>celda</sub> (voltios)</b>	2.0	1.2	3.7	3.0-4.5
<b>Energía específica (Wh/kg)</b>	10-40	60-80	70-80	80-170
<b>Energía (Wh/l)</b>	50-100	250	140-300	170-450
<b>Nº de Ciclos (80%)</b>	400-800	300-600	300-600	500-3000
<b>Coste (\$/kWh)</b>	100-125	220-400	-	250-800
<b>Impacto medioambiental</b>	Alto	Bajo	Moderado	Moderado-bajo
<b>Eficiencia energética (%)</b>	82.5	72.5	70	90

**Tabla 4.2** Parámetros energéticos por tecnología



## Capítulo 5

# Representación de un modelo de un vehículo eléctrico

## 5.1 Introducción

En el entorno de la investigación es muy importante poder simular los resultados previamente a realizar un modelo definitivo. Para poder simular los posibles resultados previos se podría realizar un modelo a escala del definitivo, pero debido a las numerosas pruebas que deben simularse, esta no sería una solución factible. Las posibilidades que ofrece la creación de modelos virtuales son infinitas respecto a la creación del modelo a escala.

Mediante programas de software como puede ser Matlab<sup>®</sup> podemos modelar de diferentes formas el comportamiento de un vehículo eléctrico. A lo largo de este proyecto hemos analizado 2 métodos de simulación:

- Mediante las ecuaciones físicas que determinan el comportamiento de un sólido rodando sobre una superficie.<sup>1</sup>
- Modelando mediante representación macroscópica de los sistemas físicos que intervienen en el comportamiento de un vehículo eléctrico (mediante Simulink).

En ambos casos, se ha tenido en cuenta una serie de variables comunes en los dos casos con el fin de poder realizar la misma simulación en los dos modos de simulaciones programados que se explicarán más adelante.

El fin que se persigue es poder ver cuál será la autonomía teórica que podrá tener el modelo creado en función de las variables de entrada para unas determinadas condiciones de conducción del vehículo con diferentes ciclos de conducción.

---

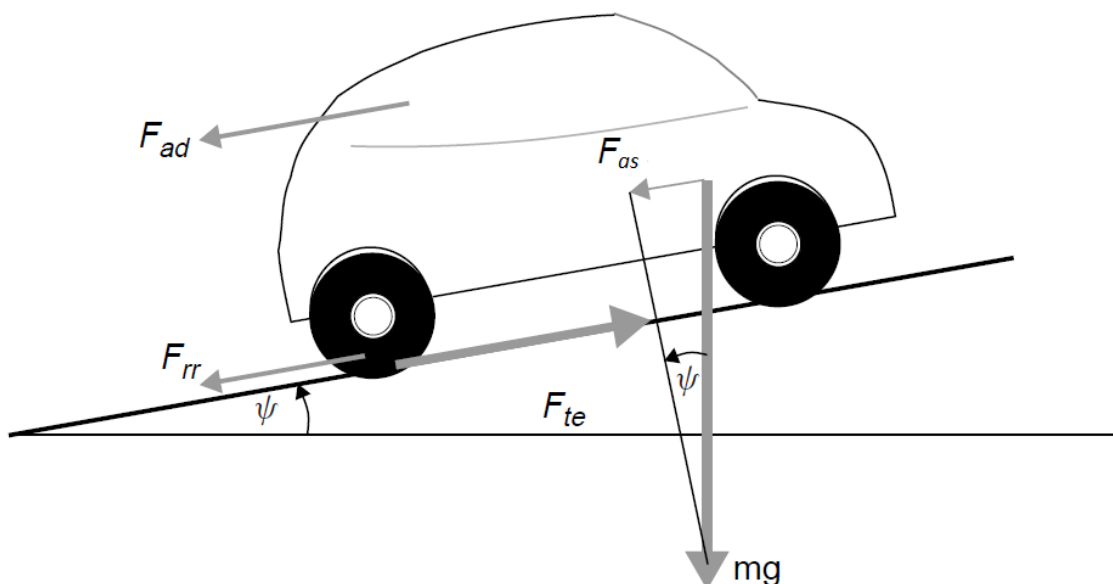
<sup>1</sup> El modelado según las ecuaciones físicas corresponde al modelo creado por *Larminie en Electric Vehicle Technology Explained* James Larminie and John Lowry 2003 John Wiley & Sons, Ltd

## 5.2 Modelado de las fuerzas actuantes sobre un vehículo.

Para comprender el comportamiento de un vehículo, ya sea eléctrico o convencional conviene conocer las fuerzas que intervienen en el movimiento del mismo. Las principales fuerzas actuantes son fácilmente reconocibles y gracias a eso se puede realizar una interpretación de ellas por medio de las ecuaciones que responden a las correspondientes leyes físicas. Esta razón es la que motiva a utilizar esas fuerzas para modelar el comportamiento de un vehículo eléctrico en este proyecto. Si bien para realizar los cálculos necesarios para conocer el comportamiento de un vehículo eléctrico se necesitarán numerosas iteraciones de cálculos, la programación de esos cálculos con Matlab conseguirá obtenerlos de forma inmediata, pero antes de entrar en la programación se debe conocer a fondo el comportamiento de las fuerzas actuantes.

Posiblemente uno de los problemas resueltos más frecuentemente por todo el mundo que en algún momento haya estudiado física es el típico problema del plano inclinado. Pues bien, a través del problema del plano inclinado, vamos a poder comprender cuales son las fuerzas que intervienen en el movimiento de un vehículo

Fuerzas actuantes sobre un vehículo que se desplaza sobre una superficie:



**Figura 5.1** Fuerzas actuantes sobre un vehículo

- Fuerza de rozamiento:

Es la fuerza resultante opuesta al movimiento debida al movimiento de un cuerpo sobre otro.

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg \quad (5.1)$$

Dónde:

$\mu_{rr}$  = Coeficiente de rozamiento

m = masa [Kg]

g = 9.8 m/s<sup>2</sup>

- Resistencia aerodinámica:

Lo primero que hay que definir es la propia resistencia aerodinámica, para que tengamos claro de qué estamos hablando: es la fuerza opuesta al movimiento que sufre un objeto sólido (vehículo) cuando se desplaza a través del aire.

Los coches tienen que apartar una cantidad importante de aire para poder avanzar y también facilitar que se rellene el vacío que generan tras de sí. La presión del aire contra el frontal y el vacío (succión) generado en la parte trasera se combinan para generar una fuerza opuesta al movimiento.

La resistencia aerodinámica depende cuatro factores: la densidad del aire, la velocidad al cuadrado, la superficie frontal y el coeficiente de resistencia aerodinámica del vehículo, todo ello multiplicándose y por tanto influyendo en la misma medida. Si dividimos el resultado de esa multiplicación entre dos, tenemos la fórmula completa, pero lo que importa aquí es lo que son y cómo actúan cada uno de esos factores.

La densidad del aire es aproximadamente constante y no la podemos variar con el diseño del vehículo, por lo que no le voy a dedicar más explicaciones.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (5.2)$$

- Dónde:

$\rho$  = Densidad del aire Se toma un valor típico de 1.25Kg/m<sup>3</sup>

A = Área frontal [m<sup>2</sup>]

C<sub>d</sub> = Coeficiente aerodinámico [Entre 0.3 y 0.19 para vehículos eléctricos]

v = velocidad [m/s]

- Fuerza de ascenso:

Es la fuerza necesaria para hacer ascender un cuerpo de una determinada masa  $m$  sobre un plano inclinado con un ángulo  $\varphi$  con la horizontal.

$$F_{as} = m \cdot g \cdot \sin \varphi \quad (5.3)$$

Dónde:

$m$  = masa [Kg]

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$\varphi$  = Ángulo que forma la superficie de rodadura con la horizontal

En este proyecto se ha considerado un ángulo de 0 grados (circulación por perfil plano) pero se podría modelar para diferentes perfiles de conducción a las diferentes alturas de un recorrido predeterminado. Para ello en la programación que veremos más adelante tendríamos que introducir un vector con las diferentes alturas del terreno y correspondiéndose esos puntos a los puntos correspondientes del ciclo de conducción utilizado, es decir, ambos vectores deben tener la misma longitud.

- Fuerza de aceleración lineal:

Esta fuerza es la resultante de los cambios de velocidad del vehículo. Es una aceleración lineal y la fórmula es la segunda ley de Newton:

$$F_{al} = m \cdot a \quad (5.4)$$

- Fuerza necesaria para dar aceleración angular:

A las piezas rotativas es necesario aplicar una determinada fuerza para superar el momento de inercia y producir el giro necesario.

$$F_{\alpha} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad (5.5)$$

Dónde:

$I$  = Momento de inercia

$G$  = Relación de transmisión entre el sistema y el motor

$\eta_g$  = Rendimiento del sistema de transmisión

$a$  = Aceleración

- Fuerza de tracción:

La acción de todas las fuerzas descritas anteriormente se considera como el esfuerzo de tracción necesario para poder hacer ascender el vehículo a través del plano inclinado

La fuerza total de tracción es la suma de todas estas fuerzas:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{ta} + F_{wa} \quad (5.6)$$

Es posible que en determinado momento alguno de los factores que componen las fuerzas anteriores debido al estado en el que se encuentre el vehículo, sean negativos. El signo del esfuerzo de tracción determina si el vehículo avanza o retrocede, pues cuando  $F_{ta} > 0$  el vehículo avanza hacia delante y en el caso contrario, las fuerzas que se oponen al movimiento son mayores y el vehículo retrocederá. En el caso de la fuerza de ascenso, se considera como sentido positivo el caso en el que el vehículo asciende una pendiente y en el caso de que  $F_{as}$  sea negativa se desciende una cuesta. Por lo tanto, la fuerza total puede llegar a ser negativa o de sentido opuesto, si alguna o varias de estas fuerzas prevalece en sentido contrario a todas las demás.

Una vez obtenido el esfuerzo de tracción necesario para mover el vehículo, podemos definir la potencia necesaria para mover el vehículo:

$$P_{te} = F_{te} \cdot v \quad (5.7)$$

Dónde:

$F_{te}$  = Fuerza de tracción

$v$  = velocidad instantanea.

El rendimiento de la transmisión mecánica del vehículo será un parámetro constante para cada tipo de vehículo y por esa razón no podemos darle un valor en este apartado pero este parámetro podrá ser asignado al valor deseado en el momento de la programación. El propio rendimiento de la transmisión interactúa con la potencia necesaria para mover el vehículo para poder definir la potencia requerida al motor. Por lo tanto en función del carácter de la velocidad (aceleración o frenado) la potencia requerida por el motor será:

En aceleración:  $P_{mot\_out} = P_{te} / \eta_g \quad (5.8)$

En frenado:  $P_{mot\_out} = P_{te} \cdot \eta_g \quad (5.9)$

El conjunto del motor eléctrico y del controlador también funcionará con un cierto rendimiento asociado a la máquina de corriente continua. El rendimiento del motor de inducción varía considerablemente con la potencia, el par y también con el tamaño del motor. El rendimiento del motor queda modelado con la siguiente ecuación:

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_\omega \omega^3 + C} \quad (5.10)$$

Dónde:

$k_c$  (coeficiente de pérdidas en el cobre) = 0.3

$k_i$  (coeficiente de pérdidas en el hierro) = 0.01

$k_\omega$  (es el coeficiente de pérdida por fricción con el aire) =  $5,0 \times 10^{-6}$

$C$  (constante de pérdidas) = 600

Una vez vistas las fuerzas y potencias de carácter mecánico que intervienen en el movimiento del vehículo el siguiente paso consta en “traducir” esa potencia mecánica necesaria para mover el vehículo con todos sus rendimientos a potencia eléctrica, Des esta forma la potencia eléctrica requerida por el motor será la mecánica con sus pérdidas asociadas vistas anteriormente, La ecuación resultante para la potencia eléctrica requerida será:

En aceleración:  $P_{mot\_in} = P_{mot\_out} / \eta_m \quad (5.11)$

En frenado:  $P_{mot\_in} = P_{mot\_out} \cdot \eta_m \quad (5.12)$

La potencia eléctrica requerida para mover el vehículo no es siempre la potencia que se demanda a la batería pues se debe considerar que dentro del vehículo hay una serie de accesorios que también funcionan con energía eléctrica y que están conectados a la batería principal del vehículo. Estos accesorios pueden ser luces, sistemas de información, equipos de sonido, aire acondicionado y calefacción, etc. El funcionamiento de estos elementos no siempre será constante y en muchos casos estarán desconectados, por esa razón el valor de la potencia consumida por estos accesorios ( $P_{acc}$ ) será un valor constante que represente un promedio del funcionamiento y las potencias de los accesorios. Por lo tanto, la potencia demandada a la batería puede representarse como la potencia necesaria para mover el vehículo más la potencia consumida por los accesorios del vehículo quedando la siguiente fórmula:

$$P_{bat} = P_{mot\_in} + P_{acc} \quad (5.13)$$

El valor de la potencia del motor, como hemos visto anteriormente puede darse el caso de ser negativa, en ese caso la potencia demandada a la batería será de menor magnitud.

## 5.3 Modelado de la batería

Para poder implementar el funcionamiento de las baterías que se pueden usar en el modelado de un vehículo eléctrico.

Al igual que el movimiento de un vehículo puede interpretarse por medio de las fuerzas actuantes sobre él mismo, la batería también puede ser representada conociendo las ecuaciones que rigen su comportamiento. En el capítulo 3 hemos podido conocer los parámetros que caracterizan a las baterías estudiadas pero ahora se podrá comprobar que fórmulas relacionan esos parámetros entre sí.

Del comportamiento y rendimiento de la batería dependerán en gran medida las prestaciones ofrecidas por el vehículo. El rendimiento de las baterías depende de variables, que en algunos casos son fáciles de medir, como son su temperatura y voltaje, y en otros casos no son tan fácilmente de adquirir como son su carga, su edad o la forma en que hayan sido tratadas en el pasado, como son factores tales como “Dod” (Profundidad de descarga o *Depth of Discharge*). Del mismo modo al que nos referimos a la profundidad de descarga también hablaremos de otro parámetro derivado de este como es el estado de carga o también llamado “SoC” (State of Charge):

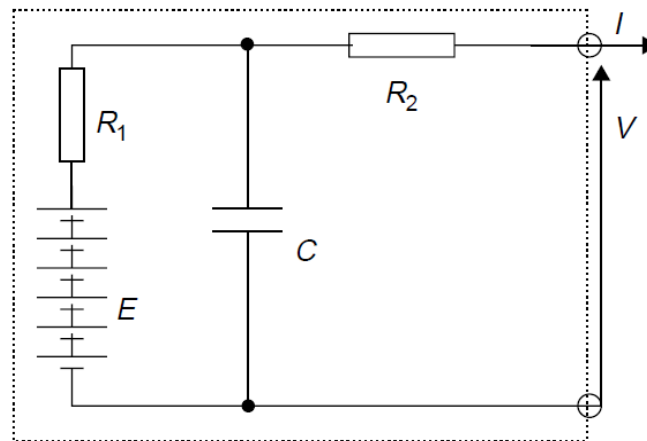
$$\text{SoC} = 1 - \text{Dod}$$

Debido a la dificultad para poder medir estos parámetros. Las tolerancias de fabricación y las variaciones entre celdas dentro de la batería también pueden tener un gran impacto en el rendimiento final.

Este modelo presenta un nivel de detalle que se aproxima al funcionamiento real porque permite tomar provecho de las medidas experimentales más relevantes disponibles en las hojas técnicas de los fabricantes o las obtenidas por métodos independientes. Estos datos suelen ser la caída de potencial en los terminales de la batería en función de la carga aplicada y la caída de

potencial debido a las variaciones de temperatura. Para ajustarse a estos datos, el modelo dispone de tres componentes:

- Un potencial  $E$
- Una resistencia interna con dos componentes  $R_1$  y  $R_2$
- Un condensador  $C$  que caracteriza la respuesta transitoria, pues la caída de voltaje cuando se aplica una carga no cae instantáneamente sino que tarda un tiempo determinado en alcanzar el equilibrio



**Figura 5.2** Esquema de funcionamiento real de una batería

A continuación vamos a ver en cuatro pasos como se comporta una batería (ya sea de plomo o NiCd) en función de la corriente demandada por la carga, que en nuestro caso sería el conjunto de maquinas eléctricas del vehículo.

#### 1. Calcular las tensiones a circuito abierto (depende del estado de carga):

Batería de plomo-ácido

$$E = n[2.15 - DoD \cdot (2.15 - 2.00)] \quad (5.14)$$

Batería de Níquel-Cadmio

$$E = n \left[ \begin{aligned} &-8.28 \cdot DoD^7 + 23.57 \cdot DoD^6 - 30 \cdot DoD^5 + 23.7 \cdot DoD^4 - 12.58 \cdot DoD^3 + \\ &4.13 \cdot DoD^2 - 0.86 \cdot DoD + 1.37 \end{aligned} \right] \quad (5.15)$$

Dónde:

$n$  = número de celdas que componen la batería

$DoD$  = Profundidad de descarga (Depth of Discharge)



Inicialmente debemos dar un valor de profundidad de descarga para comenzar a realizar la simulación y a partir de este valor y de los datos calculados, los nuevos datos de profundidad de descarga se irán actualizando.

## 2. Calcular la corriente por la batería:

En un principio, el valor de la potencia eléctrica consumida sería un dato que desconoceríamos, pero en realidad ese dato ya lo habríamos calculado. Tomamos la suposición de que la potencia eléctrica demandada será igual a la potencia necesaria para mover el vehículo que hemos visto en el apartado anterior como se calculaba:

$$P_{te} = F_{te} \cdot v = P_{eléctrica} \quad (5.16)$$

Por otro lado se sabe cuáles son las componentes que intervienen en la fórmula de la potencia eléctrica demandada

$$P = V \cdot I = (E - I \cdot R) \cdot I = E \cdot I - R \cdot I^2 \quad (5.17)$$

Despejando el valor de la corriente en función del resto de variables y obtenemos la siguiente fórmula:

$$I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP}}{2 \cdot R} \quad (5.18)$$

Resistencia interna de la batería:

El valor de la resistencia interna de la batería dependerá del tipo de batería usado. Para las baterías de plomo-ácido la resistencia interna de la batería sería la siguiente:

$$R = n \cdot \frac{0.022}{C_{10}} \quad (5.19)$$

En el caso de las baterías de NiCd se deberá seguir esta otra forma de calcular la resistencia interna de la batería:

$$R = n \cdot \frac{0.06}{C_3} \quad (5.20)$$

Para comprender los términos  $C_{10}$  y  $C_3$  debemos explicar antes la *velocidad de descarga de una batería*:

Las corrientes de carga y descarga se especifican con unos términos que indican la descarga completa en un período continuo de 1h. Estos términos son C y sus múltiplos y submúltiplos nos indican diferentes velocidades de carga y descarga, pe: C/10, descarga en 10h, C/100 descarga en 100h

3. Actualizar el registro de la carga sustraída de la batería:

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \cdot I^K}{3600} Ah \quad (5.21)$$

Dónde:

$\delta t$  = Paso de integración

K = Coeficiente de Peukert (1.2 para baterías de ácido)

Para  $n = 1$ , la carga sustraída se supone que sería cero, pues al ser el primer punto de simulación se parte de la condición de que la batería está a plena carga. A partir de los siguientes puntos de simulación se irá actualizando este valor con los obtenidos de la carga sustraída en el punto anterior.

4. Actualizar el nivel de la descarga:

En función de los datos obtenidos de la carga sustraída y de la capacidad de Peukert calculada a partir de la corriente demandada obtenemos la profundidad de descarga, que a su vez hemos visto que se utiliza en el punto 1 de este apartado.

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p} \quad (5.22)$$

Dónde:

$C_p$  = Capacidad de Peukert ( $C_p = I^K \cdot T$ )

## 5.4 Proceso de cálculo de la autonomía del vehículo

Como se ha visto, el modelo del vehículo responde ante los principales fenómenos físicos que rigen el movimiento de los vehículos automóviles:

- El fenómeno de rozamiento de las ruedas con el asfalto.
- La resistencia aerodinámica al aumentar su velocidad condicionado por su forma y área frontal.
- Las inercias debidas al cambio de velocidad de su masa.
- Las inercias de los mecanismos internos.
- La fuerza sobre la masa del vehículo en los desniveles por causa de la gravedad.

Se han tenido en cuenta las ineficiencias de la transmisión y del motor de inducción, que dependen del par y del régimen de giro, así como la tasa de regeneración en caso de frenada. También permite variar la cantidad de energía auxiliar necesaria para alimentar los instrumentos del vehículo, acondicionar el aire e iluminar la calzada, según sea el caso.

Con todo ello se puede calcular el estado de descarga de la batería de una forma muy precisa y así calcular cual será la autonomía real del vehículo para las condiciones de entrada establecidas de antemano.

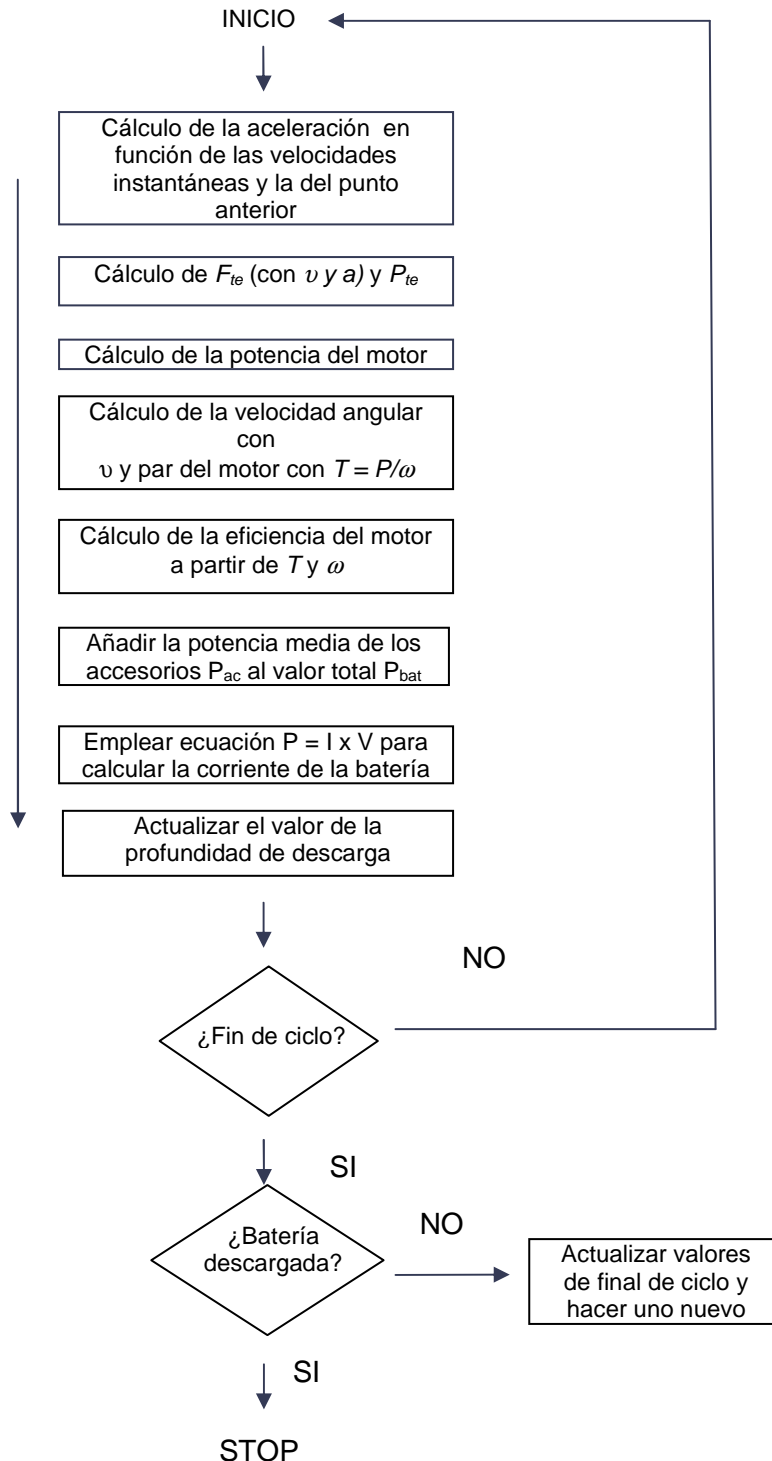
Algunas de estas condiciones son relativamente constantes en la realidad o se pueden suponer como tales, como son algunos coeficientes de ineficacias, de transmisión de calor, rozamiento rueda-asfalto, áreas medibles, etc., y por lo tanto se establecen como parámetros fijos.

Otras variables que caracterizan el sistema son variables durante el transcurso de la simulación como es la velocidad de desplazamiento. Estos parámetros que varían con el tiempo se recogen en las tablas de ciclos de conducción descritas en el apartado anterior. La selección de un determinado ciclo de conducción condicionará en gran medida la autonomía del vehículo.

- Diagrama de flujo:

El cálculo recursivo de todas las fuerzas y potencias descritas anteriormente servirá para poder ver el comportamiento del vehículo en función de los parámetros establecidos con cierto grado de exactitud. Poder comprender los pasos necesarios para resolver este problema es esencial para poder llegar a programarlo de forma adecuada. A grandes rasgos, los pasos seguidos para llegar a conocer la autonomía del vehículo en función de las ecuaciones que

actúan sobre él puede resumirse en los siguientes pasos explicados mediante un diagrama de flujo:



**Figura 5.3** Diagrama de flujo del proceso de cálculo de las fuerzas sobre el vehículo

Una vez comprendido el comportamiento del vehículo eléctrico por medio de las ecuaciones que rigen los aspectos físicos de su comportamiento se puede pasar a implementarlas mediante el software adecuado para, en función del ciclo de conducción y los aspectos constructivos deseados, obtener la autonomía teórica.

## Capítulo 6

# Representación macroscópica energética de un vehículo eléctrico mediante Simulink

## 6.1 Introducción

Dentro de los objetivos de este proyecto se encuentra el control de complejos sistemas creados en Simulink y por esa razón deberemos hacer hincapié en los sistemas modelados para comprender las partes que los componen y que función cumplen.

Antes de entrar en el modelado de sistemas es conveniente hablar de Simulink y su entorno. Simulink permite modelar sistemas utilizando elementos disponibles en las diferentes bibliotecas de Simulink. Esos elementos se arrastran al área de trabajo donde son configurados y/o conectados a otros elementos, por esa razón se considera un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. De esta forma los sistemas creados no conservan el lenguaje normal de Matlab (\*.m) sino que son creados en su propia extensión (\*.mdl). Por esa razón se considera Simulink como una herramienta de simulación de modelos o sistemas, que se centra en los elementos disponibles y en su funcionamiento y no en el entorno. Se emplea arduamente en Ingeniería, en temas relacionados con el procesamiento digital de señales. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica. Con el uso de múltiples sistemas de los disponibles en Simulink se pueden crear sistemas mucho más complejos, que no solo realicen simulaciones sino que también proporcionen al usuario datos de las variables que intervienen en los procesos.

Para la parte que interesa en este proyecto, se observa que se puede llevar a cabo la simulación de un vehículo eléctrico mediante Simulink y entrando en detalle en la simulación, utilizaremos la Representación Energética Macroscópica que pasaremos a explicar detalladamente a continuación.

## 6.2 Representación Energética Macroscópica (EMR)

Una buena manera de entender el comportamiento energético del vehículo, pasa por representar los flujos de energía que intervienen en el proceso de funcionamiento de este. Para ello se utiliza la llamada Representación Energética Macroscópica (REM o en inglés Energetic Macroscopic Representation, EMR). La Representación Energética macroscópica (EMR) se ha introducido en el año 2000 para el desarrollo de la investigación en las complejas unidades electromecánicas especialmente multi-unidades de sistemas. EMR se basa en el principio de acción-reacción, que organiza el sistema en subsistemas interconectados de acuerdo con la causalidad integral. Los bloques cuentan con variables de entrada (flechas hacia el bloque) y de salida (flechas saliendo hacia del bloque) que serán datos (entrada) e incógnitas (salida) en el planteamiento posterior de ecuaciones para identificar ese bloque analíticamente.

A continuación, se detallará en las siguientes secciones como se ha modelado cada bloque de Simulink para representar mediante EMR un vehículo eléctrico para realizar una simulación en MATLAB.

## 6.3 Simulación de un vehículo eléctrico con representación macroscópica energética.

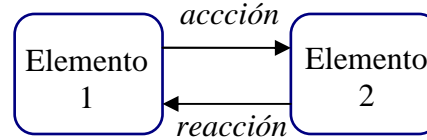
### - Objetivo.

El objetivo de este trabajo es comenzar a trabajar con EMR, simulando un vehículo eléctrico alimentado por una batería, que alimenta una máquina de CC a través de un chopper. La máquina de CC está conectada a una caja de engranajes, simplificada con la ración de engranajes, que convierte a los ejes de las ruedas.

### - Principios de la EMR

La representación macroscópica Energética es una descripción gráfica que se utiliza para organizar los modelos de un sistema real. Se basa en dos principios: la interacción y el principio de causalidad, y busca poner de relieve las propiedades energéticas de los elementos (fuente, acumulación, distribución de energía, etc)

- Principio Interacción: Se basa en la idea de que cada acción de un elemento 1 a un elemento 2 tiene una reacción de 2 a 1. La potencia se transmite desde 1 hasta 2 y es el resultado de la multiplicación de la acción y la reacción.



**Figura 6.1** Acción-reacción entre dos elementos

- Principio de causalidad: El objetivo es respetar el orden causal en el que tienen lugar los acontecimientos. Por lo tanto, la causa de que el sistema será la de entrada, mientras que el efecto será salidas, y estas salidas será el resultado de integrar los insumos. El respeto del principio de causalidad es debido al hecho de que la integración de una variable es posible, ya que incluye los acontecimientos del pasado. Sin embargo, la derivación implica el conocimiento de los valores futuros, que no es posible.

#### - Modelado

Antes de comenzar con la simulación, hay que definir las ecuaciones para cada elemento involucrado. Las variables y constantes que intervienen en los procesos y configuran los sistemas serán establecidas en forma de variable, es decir, no estableceremos el valor numérico en simulink sino que a los parámetros les daremos el nombre adecuado de la variable para poder ser controlados por la interfaz como veremos en el siguiente capítulo.

#### - Batería

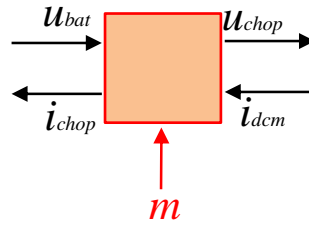
La batería está representada por una fuente de tensión ideal con un valor  $V$ . El valor de " $V$ " será establecido desde la interfaz. El elemento de EMR será una fuente, con tensión y la corriente como la acción como reacción.

#### - Chopper

La función de chopper es adaptar la tensión de la batería a la necesaria por la máquina de corriente continua. Reduce la tensión de la batería con el fin de suministrar la máquina de CC, siendo  $m$  la relación de modulación para el chopper.

$$\begin{cases} u_{chop} = m u_{bat} \\ i_{chop} = m i_{dc} \end{cases} \quad (6.1)$$





**Figura 6.2** Bloque representativo del chopper

En este bloque la acción de salida es la tensión del chopper ( $U_{chop}$ ) mientras que la reacción que la entrada en el bloque es la corriente

- Máquina de corriente continua.

La máquina utilizada para esta simulación es un motor de imanes permanentes de corriente continua, esto implica que no hay sistema de excitación externa y tiene que ser controlada. La ecuación para la tensión de armadura de la máquina de corriente continua es:

$$u_{chop}(t) = L_{arm} \frac{di(t)}{dt} + R_{arm} i(t) + e_{dcm}(t) \quad (6.2)$$

Dónde:

$u_{chop}$ : tensión de armadura.

$L_{arm}$ ,  $R_{arm}$ : inductancia de la armadura y resistencia.

$e_{dcm}$ : Fuerza contra-electromotriz.

La corriente puede ser obtenida de la siguiente ecuación:

$$u_{chop}(s) - e_{dcm}(s) = (R_{arm} + L_{arm}s)i(s)$$

$$i(s) = \frac{u_{chop}(s) - e_{dcm}(s)}{R_{arm} + L_{arm}s} = \frac{\frac{1}{R_{arm}} [u_{chop}(s) - e_{dcm}(s)]}{1 + \frac{L_{arm}}{R_{arm}}s} = \frac{K_{arm}}{1 + \tau_{arm}s} [u_{chop}(s) - e_{dcm}(s)] \quad (6.3)$$

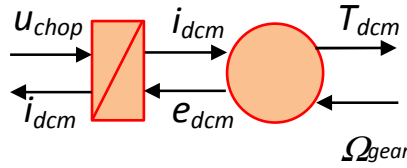
A continuación definiremos las ecuaciones para la fuerza contra-electromotriz y el par. El concepto EMR es asociar una variable eléctrica con una variable mecánica, hecho con las ecuaciones:

$$\begin{cases} e_{dcm} = k\Phi\Omega_{gear} = k_{dcm}\Omega_{gear} \\ T_{dcm} = k\Phi i_{dcm} = k_{dcm}i_{dcm} \end{cases} \quad (6.4)$$

La fuerza contra-electromotriz ( $e_{dcm}$ ) está asociada a la velocidad de marcha  $\Omega_{gear}$ , mientras que la corriente ( $i_{dcm}$ ) esta asociada al par.  $k_{dcm}$  puede establecerse como un valor constante:

$$k_{dcm} = \frac{u_{arm\_rated} - R_{arm}i_{arm\_rated}}{\Omega_{rated}} \quad (6.5)$$

El modelo de la máquina eléctrica se separa en los fenómenos eléctricos y electro-mecánicos. Se produce un fenómeno eléctrico en forma de almacenamiento de energía debido a la inductancia presente en el inducido.

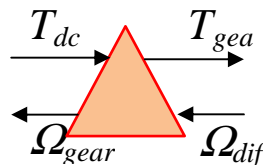


**Figura 6.3** Bloque representativo de la máquina eléctrica

#### - Transmisión

La transmisión se ha definido como un engranaje simple de tal forma que para conocer tanto el par como la velocidad transmitida, debemos multiplicar los valores de par y velocidad en el eje del motor por la constante de la transmisión ( $k_{gear}$ ).

$$\begin{cases} T_{gear} = k_{gear}T_{dcm} \\ \Omega_{gear} = k_{gear}\Omega_{diff} \end{cases} \quad (6.6)$$

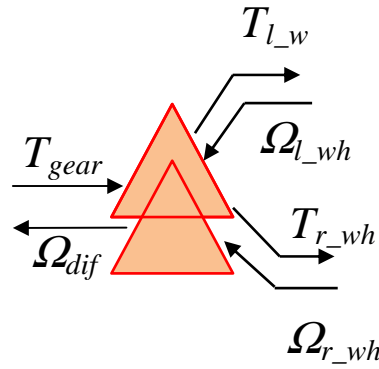


**Figura 6.4** Bloque de la transmisión

#### - Diferencial

El diferencial es el elemento capaz de transmitir el par proporcionado por la máquina de corriente continua a través del diferencial a las ruedas. Al mismo tiempo permite que las ruedas de un mismo eje giren a distintas velocidades como en el caso de producirse el giro del vehículo.

$$\begin{cases} T_{dif\_l} = T_{dif\_r} = \frac{1}{2} T_{gear} \\ \Omega_{dif} = \frac{1}{2} (\Omega_{l\_wh} + \Omega_{r\_wh}) \end{cases} \quad (6.7)$$

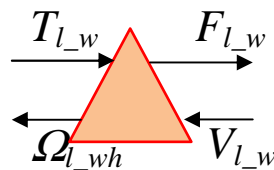


**Figura 6.5** Bloque del diferencial

#### - Ruedas

La rueda puede considerarse como un convertidor mecánico pues es capaz de convertir el movimiento de rotación en movimiento de avance proporcionando empuje al vehículo.

$$\begin{cases} F_{l\_wh} = \frac{1}{R_{wh}} T_{l\_dif} \\ \Omega_{l\_wh} = \frac{1}{R_{wh}} v_{l\_wh} \end{cases} \quad (6.8)$$



**Figura 6.6** Bloque del eje de ruedas

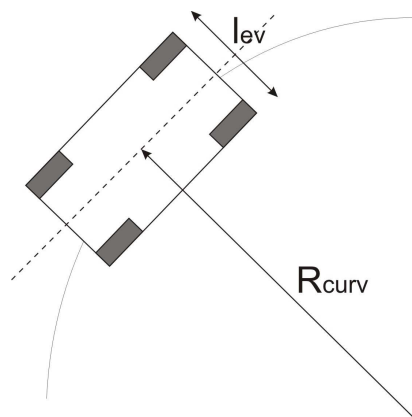
La entrada al bloque es el par proporcionado por el diferencial en función de la velocidad de la rueda considerándose esta como la reacción del bloque a la entrada del par. A cada rueda se le aplicará un par determinado del modo que habrá un bloque por cada rueda directriz.

#### - Chasis

Podemos distinguir la concurrencia de dos sucesos en el chasis:

- Acoplamiento mecánico: hasta ahora sólo tenemos las fuerzas en cada rueda, pero no para todo el vehículo. Realmente, las ecuaciones deben ser para la rueda interior y exterior, como las ecuaciones cambiará dependiendo de si el vehículo está girando hacia la izquierda o hacia la derecha. Pero el modelo se simplifica para suponer que sólo gira a la derecha.

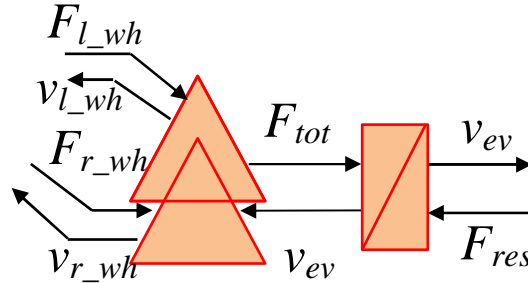
$$\left\{ \begin{array}{l} v_{l\_wh} = \frac{R_{curv} + l/2}{R_{curv}} v_{ev} \\ v_{r\_wh} = \frac{R_{curv} - l/2}{R_{curv}} v_{ev} \\ F_{tot} = F_{l\_wh} + F_{r\_wh} \end{array} \right. \quad (6.9)$$



**Figura 6.7** Diagrama de giro del vehículo

- Almacenamiento de energía: el chasis también se puede considerar como un elemento de almacenamiento de energía, ya que es capaz de absorber la energía durante un choque y convertirla en deformación mecánica.

$$F_{tot} - F_{res} = M \frac{dv_{ev}}{dt} \quad (6.10)$$



**Figura 6.8** Bloques del giro de la ruedas

#### - Definir variables de entrada y salida

Al modelar el chasis por medio de EMR, y como hemos comentado en el párrafo, el chasis se comporta como un sistema de almacenamiento de energía, así que lo primero será identificar la salida de este sistema de almacenamiento de energía. Según el principio de causalidad, no deben ser operadores de derivados, por lo que la única salida posible es la tensión  $v_{ev}$  (velocidad del vehículo eléctrico). Conocida la salida, la entrada desde el lado de las ruedas sólo puede ser el  $F_{tot}$  (fuerza total), mientras que la entrada desde el lado de la reacción será  $F_{res}$  (fuerza entregada por el medio ambiente).

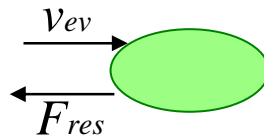
Una vez definidas las entradas de las acciones y las reacciones del sistema de almacenamiento, es posible definir el acoplamiento mecánico. La entrada de la acción para el acoplamiento mecánico corresponde a las fuerzas de las ruedas izquierda y derecha. La salida de la acción será la fuerza total. La entrada de reacción será la velocidad del vehículo y la reacción de la salida será velocidad lineal de la rueda.

#### - Entorno

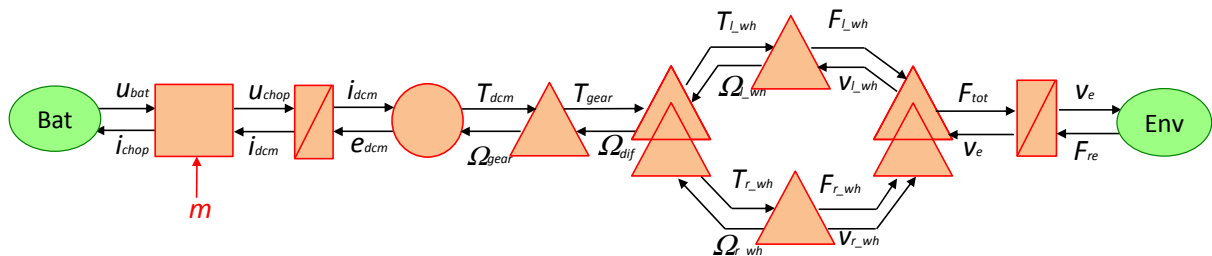
El entorno tiene en cuenta las fuerzas de resistencia que se deben superar para iniciar el movimiento del vehículo. Estas fuerzas son debido a la resistencia aerodinámica,  $F_o$  inicial resistencia a la rodadura y la fuerza de la gravedad. En la ecuación de a y b son coeficientes de rodadura,  $\alpha$  el ángulo de la pendiente y de la gravedad g

$$F_{res} = F_o + av_{ev} + bv_{ev}^2 + Mg \sin \alpha \quad (6.11)$$

En la ecuación de  $a$  y  $b$  son coeficientes de rodadura,



El resultado de todos los bloques descritos anteriormente queda de la siguiente forma:

Control

- Principio de inversión: el control debe definir los valores de las entradas de cada sistema, dependiendo de la salida deseada. El procedimiento

de inversión debe partir siempre de la cola a la cabeza del sistema. Esto es al revés de control, donde cada entrada se calcula con el fin de garantizar la salida deseada.

Si la relación entre la entrada y la salida no depende del tiempo, puede ser fácilmente invertida:

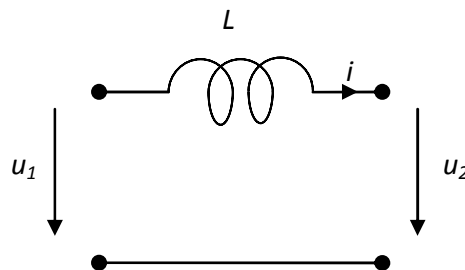
$$\begin{aligned} y &= kx \\ x &= \frac{1}{k} y \end{aligned} \quad (6.12)$$

Pero cuando la relación es dependiente de tiempo, no es posible llevar a cabo una inversión directa, ya que esto sería un derivado de causalidad. La solución es invertir indirectamente, mediante medida directa y controladores en bucle cerrado.

$$\begin{aligned} y(t) &= \int x(t) dt \\ x(t) &= \frac{dy(t)}{dt} \rightarrow \text{Does not respect the causality principle} \end{aligned} \quad (6.13)$$

Inductancia de la máquina eléctrica

Se considera la inductancia como un elemento que almacena energía



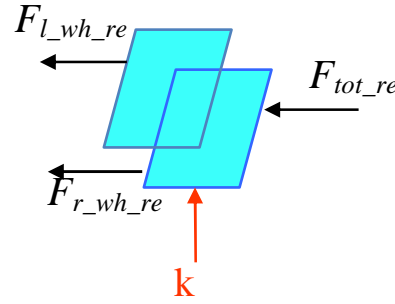
**Figura 6.11** Inductancia de la máquina eléctrica

La corriente debe ser el resultado de la acción de la inductancia, con el fin de respetar el principio de causalidad, pero para la inversión sería necesario obtener la tensión a través de la derivada.

$$u_2(t) = u_1(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (6.14)$$





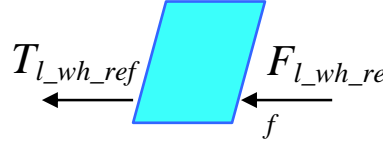


**Figura 6.13** Inversión del chasis

#### - Ruedas

Las ruedas también pueden ser directamente invertidas en EMR debido a que la relación entre el par y la fuerza no es dependiente del tiempo. La siguiente ecuación es para la rueda derecha. De forma análoga se puede conseguir para el lado izquierdo.

$$T_{r\_dif\_ref} = R_{wh} F_{r\_wh\_ref} \quad (6.17)$$

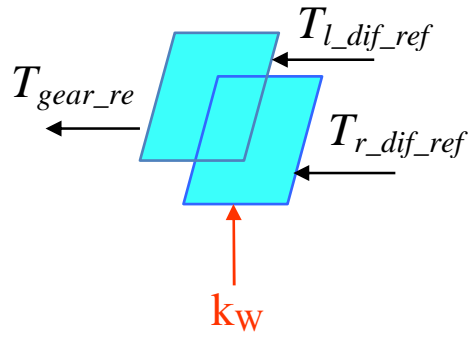


**Figura 6.14** Inversión del eje de ruedas

#### - Diferencial

El diferencial de EMR es un acoplamiento mecánico de un elemento (caja de cambios) a dos elementos (ruedas). Así, el bloque de inversión debe conectar dos elementos a uno.

$$T_{gear\_ref} = k_W T_{l\_dif\_ref} + (1 - k_W) T_{r\_dif\_ref} \quad (6.18)$$

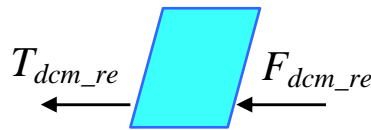


**Figura 6.15** Inversión del diferencial

- Caja de cambios

La caja de cambios es un convertidor mecánico, por lo que el bloque de inversión sólo llevará a cabo una inversión directa, con la siguiente ecuación.

$$T_{dcm\_ref} = \frac{1}{k_{gear} \eta_{gear-diff}} T_{gear\_ref} \quad (6.19)$$

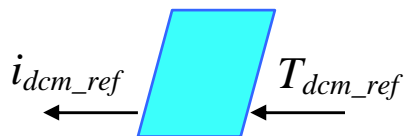


**Figura 6.16** Inversión de la transmisión-caja de cambios

- Máquina de corriente continua.

La máquina eléctrica CC necesitan dos bloques, uno para la inversión de la inductancia y otro para la conversión electro-mecánica. Como el proceso de inversión es del final a la cabeza, la inversión debe comenzar con la inversión electro-mecánica, que es una inversión directa.

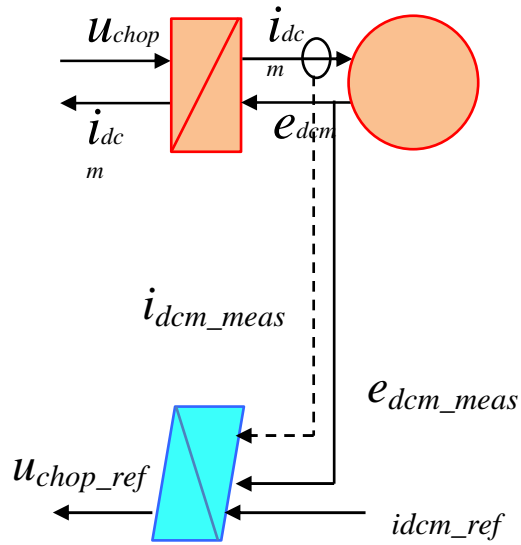
$$i_{dcm\_ref} = \frac{1}{k_{dcm}} T_{dcm\_ref} \quad (6.20)$$



**Figura 6.17** Inversión de la máquina eléctrica

La inversión de la inductancia se debe hacer indirectamente con el fin de respetar el principio de causalidad.

$$u_{chop\_ref}(t) = e_{dcm\_ref}(t) + C_{PI}(t)(i_{dcm\_ref}(t) - i_{dcm\_meas}(t)) \quad (6.21)$$

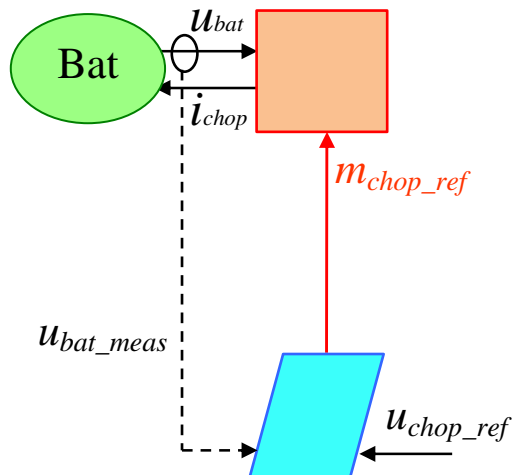


**Figura 6.18** Inversión de la inductancia

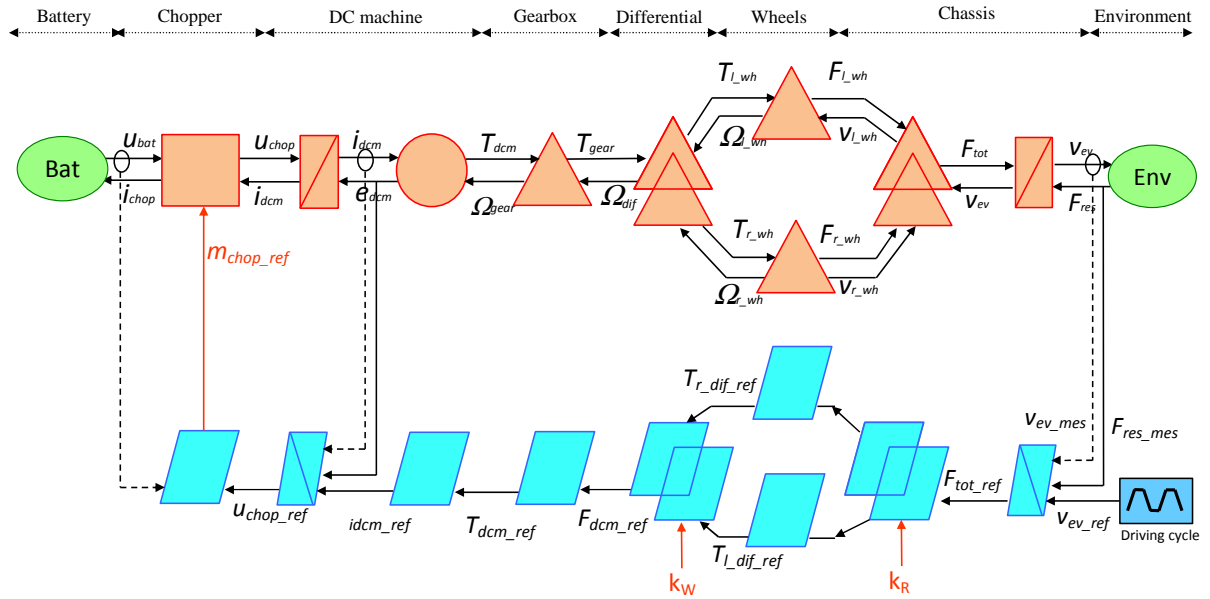
- Chopper

El chopper es un convertidor eléctrico que puede ser directamente invertido. La salida de esta inversión será la señal de control del chopper.

$$m_{chop\_ref} = \frac{1}{u_{bat\_meas}} u_{chop\_ref} \quad (6.22)$$



**Figura 6.19** Inversión del chopper



**Figura 6.20** Diagrama completo

## Capítulo 7

# Ciclos de conducción

## 7.1 Introducción

Cuando se persigue el objetivo de intentar conocer la autonomía de un vehículo eléctrico uno de los principales factores que interviene (a parte de los aspectos constructivos) es conocer el medio por donde se va a mover el vehículo eléctrico. Al igual que los vehículos con motores de combustión en los que el consumo puede depender de si se ha realizado la medición en un entorno urbano, extraurbano o por carretera, en los vehículos eléctricos la energía demandada a la batería no será igual cuando se circule por entornos urbanos o se conduzca por vías interurbanas.

Con el fin de poder comparar el comportamiento de un vehículo eléctrico con el resto de vehículos, existe una serie de ciclos de conducción normalizados para realizar los test oportunos. Un ciclo de conducción consta de una secuencia de tiempos a los cuales les corresponde un determinado valor de la velocidad instantánea en ese momento de tiempo. En esos ciclos se representan las velocidades a las que circularía un vehículo en determinadas condiciones de tráfico o entorno. A grandes rasgos podemos dos tipos de test de conducción:

- Test a velocidad constante: En la práctica los vehículos no suelen circular a velocidades constantes y estos tests son poco prácticos salvo en casos específicos.
- Test con ciclos de conducción normalizados: Se representan condiciones de circulación similares a las que pueden llevar a cabo en la vida real. El objetivo principal de los tests de conducción normalizados era conseguir medir la emisión de partículas en vehículos de motor de combustión. Puesto que con estas mediciones se conoce también la autonomía de los vehículos de motor de combustión, la aplicación de ciclos de conducción normalizados a vehículos eléctricos es una herramienta muy potente para poder comparar el rendimiento de ambos.

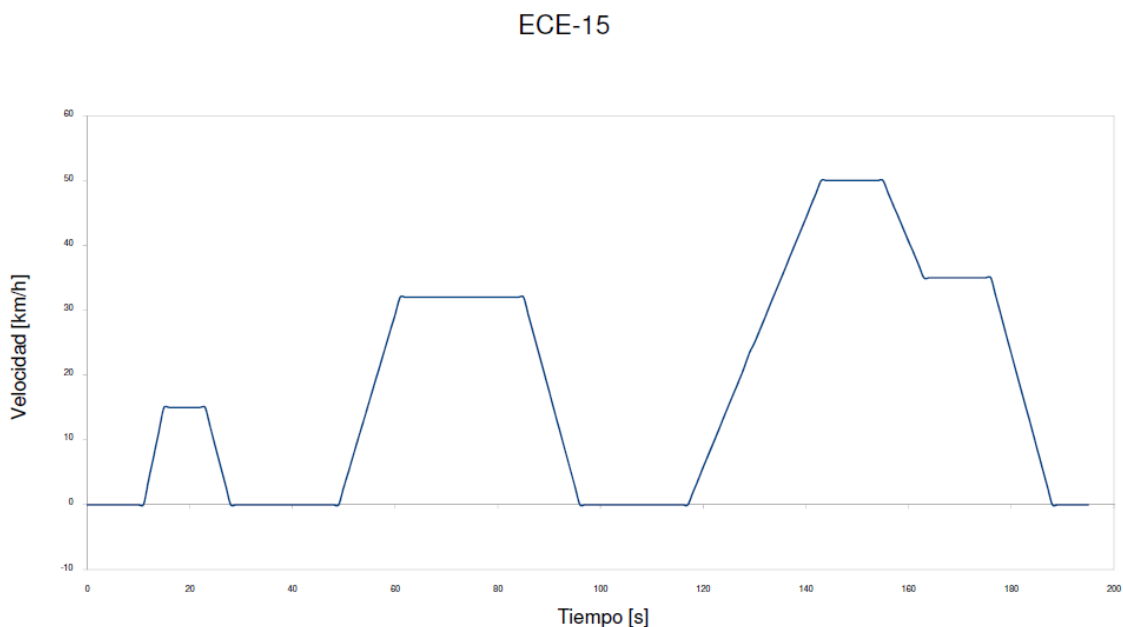
## 7.2 Ciclos de conducción normalizados

### - Ciclos de conducción estándar de la Unión Europea

Son ciclos teóricos, similares a los ciclos modales japoneses. Los más utilizados son el ciclo ECE-15, el EUDC, el EUDCL y el NEDC. Cabe destacar que en Europa existen unos ciclos no oficiales, que gozan de cierta importancia que son los ciclos conocidos como HYZEM, ciclos realistas que pueden resultar útiles pero cuyos resultados no pueden validarse debido a su falta de oficialidad.

#### 7.2.1 ECE-15

Representa un ciclo urbano con velocidades limitadas a 50 Km/h y una duración de 195 segundos. Consta de 3 periodos de aceleración constante, 4 tramos de deceleración constante y 4 zonas a velocidad constante.

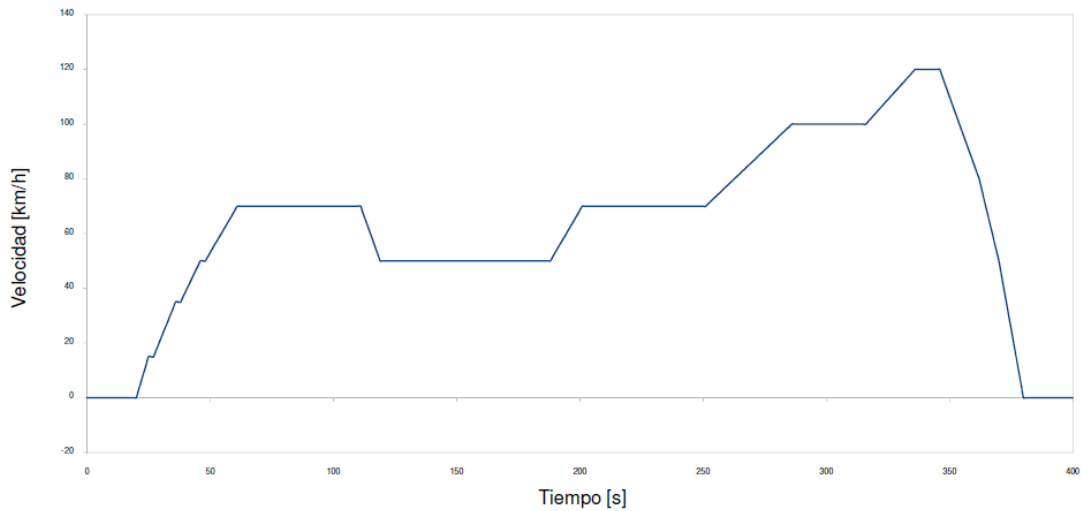


**Figura 7.1** Ciclo de conducción ECE-15

#### 7.2.2 EUDC

Representa una conducción extraurbana (velocidad entre 50 y 70 km/h) analizando con una incorporación a una autopista (en dos fases, primero aceleración hasta 100 km/h y luego hasta 120 km/h) antes de frenar hasta detener el vehículo.

EUDC

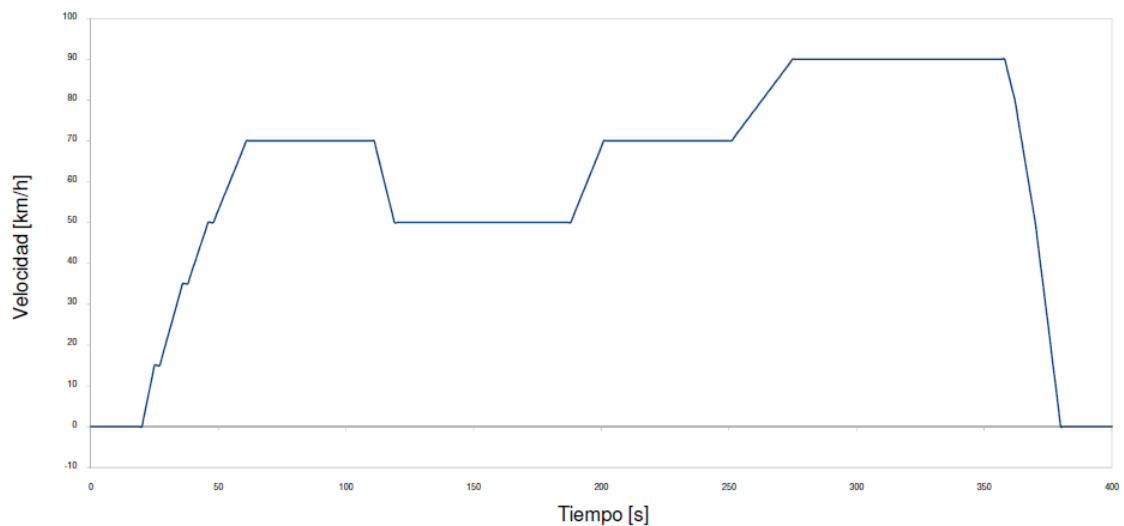


**Figura 7.2** Ciclo de conducción EUDC

### 7.2.3 EUDCL

Es igual que el ciclo EUDC pero limitado a 90 km/h, es decir, los tramos del EUDC en los que se superan los 90 km/h en \_este se sustituyen por tramos a velocidad constante de 90 km/h. Esto es debido a que es un ciclo ideado para vehículos de bajas prestaciones.

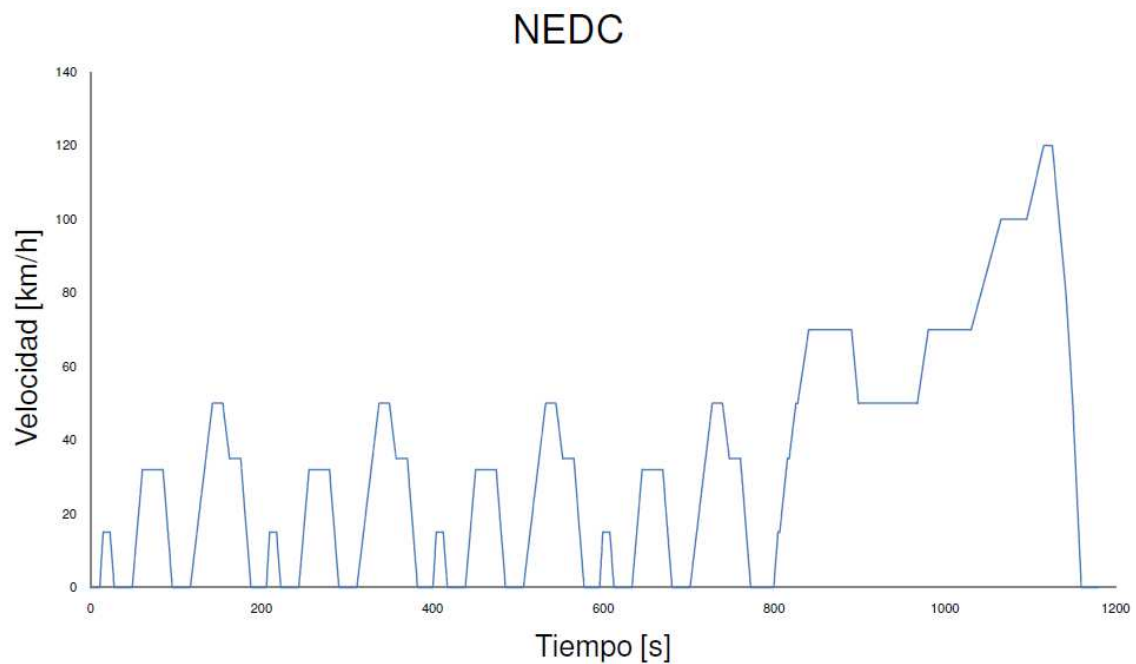
EUDCL



**Figura 7.3** Ciclo de conducción EUDCL

#### 7.2.4 NEDC

Es el ciclo oficial para homologar emisiones contaminantes y autonomía de vehículos en Europa. También conocido como MVEG-A, es una combinación de 4 ciclos ECE-15 y un ciclo EUDC al final, para tratar de simular las proporciones entre circulación urbana y extraurbana que se realizan en la Unión Europea. La duración del ciclo es el 1180 segundos.



**Figura 7.4** Ciclo de conducción NEDC

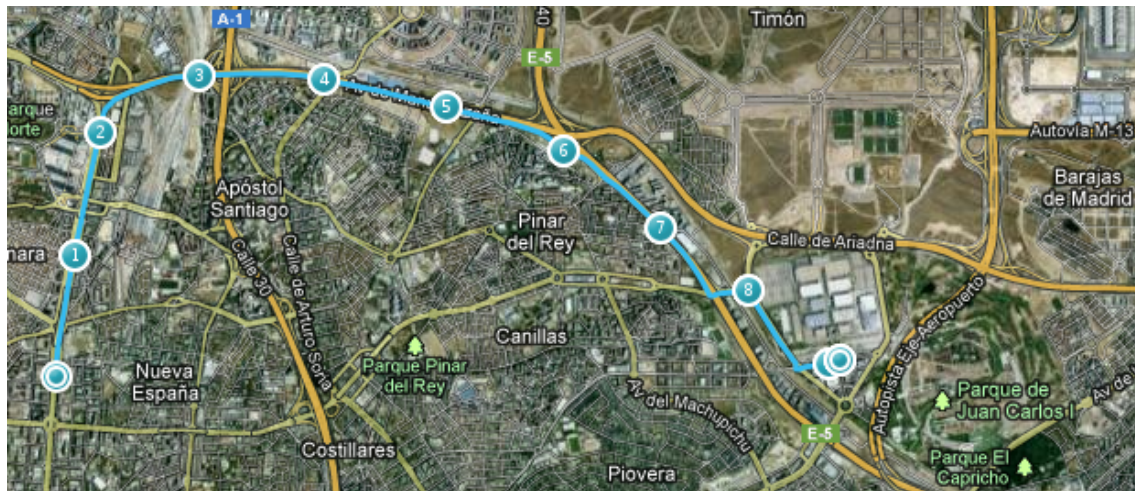


## 7.3 Ciclo de conducción experimental

Con el objetivo de poder obtener datos que se asemejen de forma práctica a la realidad en este proyecto se propone un ciclo de conducción correspondiente a un trayecto real con el fin de poder ver los resultados de forma más práctica.

El trayecto se ha efectuado en la ciudad de Madrid entre un intercambiador de transportes (Plaza de Castilla) y un centro de negocios donde se ubica un gran número de empresas (IFEMA). La elección de este recorrido se debe a que la mayor parte de los trayectos que se realizan a diario son de gente que se dirige a sus centros de trabajo y estos trayectos debido a su recorrido constante y de una distancia conocida y de longitud moderada son los más propicios para la implantación del vehículo eléctrico. El recorrido realizado se ha efectuado en condiciones normales de tráfico por vías tanto urbanas como extraurbanas a bordo de un vehículo tipo Smart con motor de gasolina. Los datos han sido recopilados mediante GPS a bordo del vehículo.

Vista aérea del recorrido efectuado:



**Figura 7.5** Ciclo de conducción experimental

Datos obtenidos vía GPS:

<b>Ciclo Experimental</b>	Plaza de Castilla - Ifema
<b>Hora de inicio</b>	10-oct-2012 14:56
<b>Distancia</b>	9.09 km
<b>Duración</b>	11m:12s
<b>Velocidad Prom</b>	48.70 Km/h
<b>Velocidad Máx</b>	90 Km/h
<b>Altitud</b>	723 m / 789 m
<b>Elevación</b>	13 m ↑ / 64 m ↓

Tabla 7.1 Datos del ciclo de conducción experimental

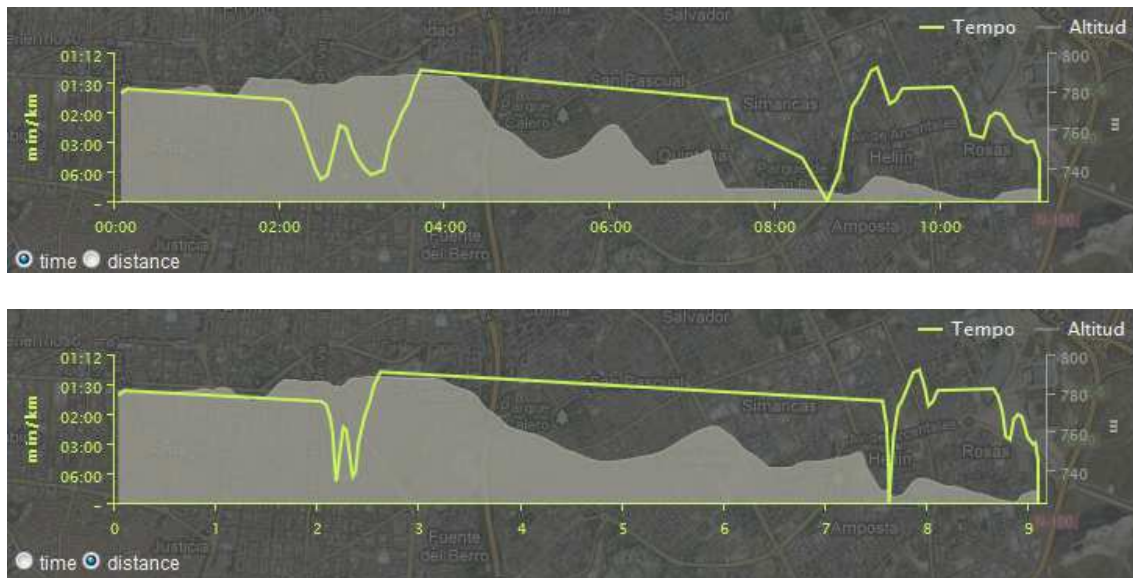


Figura 7.6 Perfil del ciclo de conducción experimental

## Capítulo 8

# Herramienta de diseño de vehículos eléctricos

## 8.1 Introducción

Llegados a este punto es aconsejable hacer un breve repaso de los temas que se han tratado en capítulos anteriores de este proyecto. En ellos se ha podido conocer:

- En que consiste un vehículo eléctrico.
- Las tecnologías usadas en baterías para vehículos.
- Las fuerzas que intervienen en un vehículo eléctrico.
- Modelado mediante simulink de un vehículo eléctrico.

Pero el más importante de ellos es el referente a la motivación de este proyecto y es conseguir crear un programa que ayude a simular vehículos eléctricos para ayudar a los alumnos en la asignatura del departamento de Ingeniería Eléctricas. Para poder aplicar los conocimientos teóricos explicados a lo largo de este proyecto se ha decidido utilizar el software Matlab por considerarse de gran utilidad dentro de las labores docentes y por suponer que los alumnos ya han sido introducidos a él a lo largo de alguna otra asignatura. Además, Matlab dispone de la herramienta Simulink donde poder desarrollar complejos sistemas en un entorno de programación visual.



**Figura 8.1** Matlab-Simulink

Dentro del abanico de aplicaciones que ofrece Matlab, existe la posibilidad de crear interfaces de usuario (GUI - Graphical user interface), las cuales permiten

al usuario poder interactuar más fácilmente con Matlab sin tener que realizar cambios en el código asociado que estemos usando. Por todas estas razones se considera oportuno realizar una introducción al software utilizado en este proyecto detallando las principales características que lo componen.

## 8.2 Interfaz gráfica. GUIDE

Matlab permite desarrollar fácilmente un conjunto de pantallas (paneles) con botones, menús, ventanas, etc., que permiten utilizar de manera muy simple programas realizados dentro de este entorno. Este conjunto de herramientas se denomina interfaz gráfica de usuario (GUI). Las posibilidades que ofrece MATLAB no son muy amplias, en comparación a otras aplicaciones de Windows como Visual Basic, Visual C. La elaboración de GUIs puede llevarse a cabo de dos formas, la primera de ellas consiste en escribir un programa que genere la GUI (script), la segunda opción consiste en utilizar la herramienta de diseño de GUIs, incluida en el Matlab, llamada GUIDE. En esta sección se abordarán ambas formas de crear GUIs. Para poder hacer programas que utilicen las capacidades gráficas avanzadas de MATLAB hay que conocer algunos conceptos que se explican en los siguientes apartados

El panel GUI se crea en una ventana, identificada como figura y está formada por los siguientes elementos:

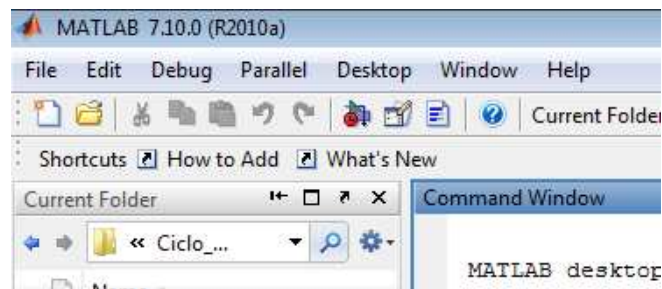
- Menú de interfaz con el usuario.
- Dispositivos de control de la interfaz con el usuario.
- Ejes para desplegar las gráficas o imágenes.

Para la creación de interfaces la herramienta que proporciona Matlab es GUIDE. GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) es un juego de herramientas que se extiende por completo el soporte de MATLAB, diseñadas para crear GUI's (Graphical User Interfaces) fácil y rápidamente dando auxilio en el diseño y presentación de los controles de la interfaz, reduciendo la labor al grado de seleccionar, tirar, arrastrar y personalizar propiedades.

Una vez que los controles están en posición se editan las funciones de llamada (Callback) de cada uno de ellos, escribiendo el código de MATLAB que se ejecutará cuando el control sea utilizado. Siempre será difícil diseñar GUIs, pero no debería ser difícil implementarlas. GUIDE está diseñado para ser menos tedioso el proceso de aplicación de la interfaz gráfica y obviamente para trabajar como herramienta de trazado de GUIs, entre sus poderosos componentes está el editor de propiedades (property editor), este se encuentra disponible cualquier momento que se esté lidiando con los controles de

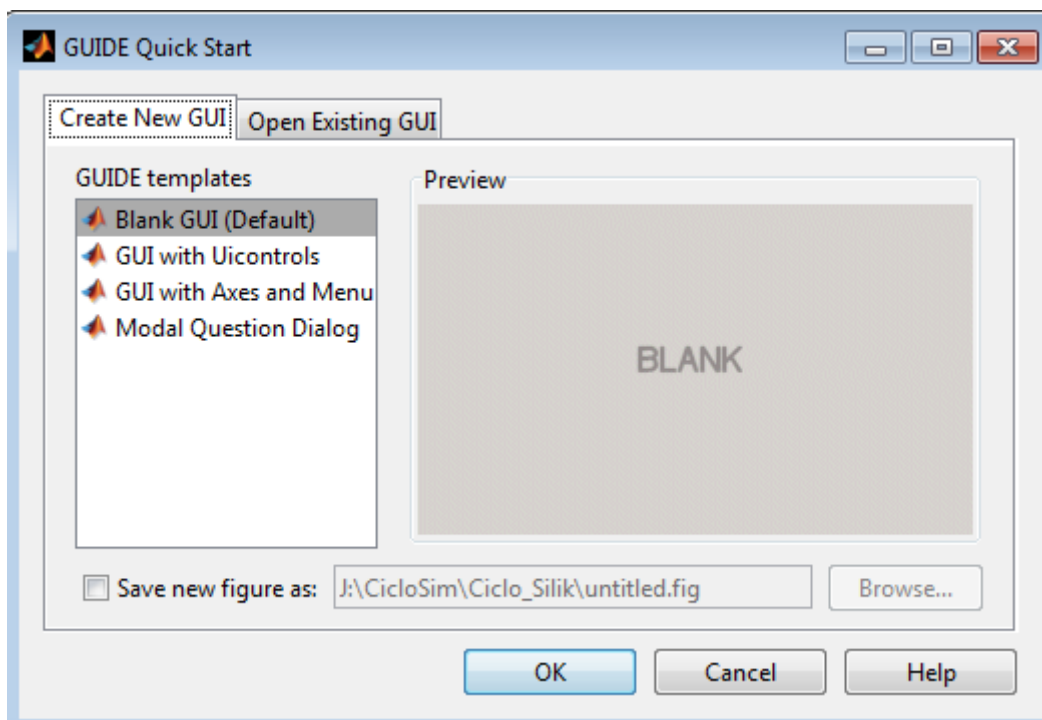
MATLAB, el editor de propiedades por separado se puede concebir como una herramienta de trazado, y asistente de codificación revisión de nombres y valores de propiedades). Cuando se fusiona con el panel de control, el editor de menú, y herramienta de alineación, resulta una combinación que brinda inigualable control de los gráficos en MATLAB.

Para acceder a la herramienta GUIDE en la barra de opciones de Matlab encontramos el icono con el que llegar a la herramienta GUIDE que es la que permite crear interfaces de usuario. Una vez pulsado, aparecerá la siguiente ventana:



**Figura 8.2** Barra de comandos de Matlab

Una vez seleccionada la herramienta GUIDE. El propio menú de la herramienta pregunta si se desea abrir un proyecto existente o crear uno nuevo:

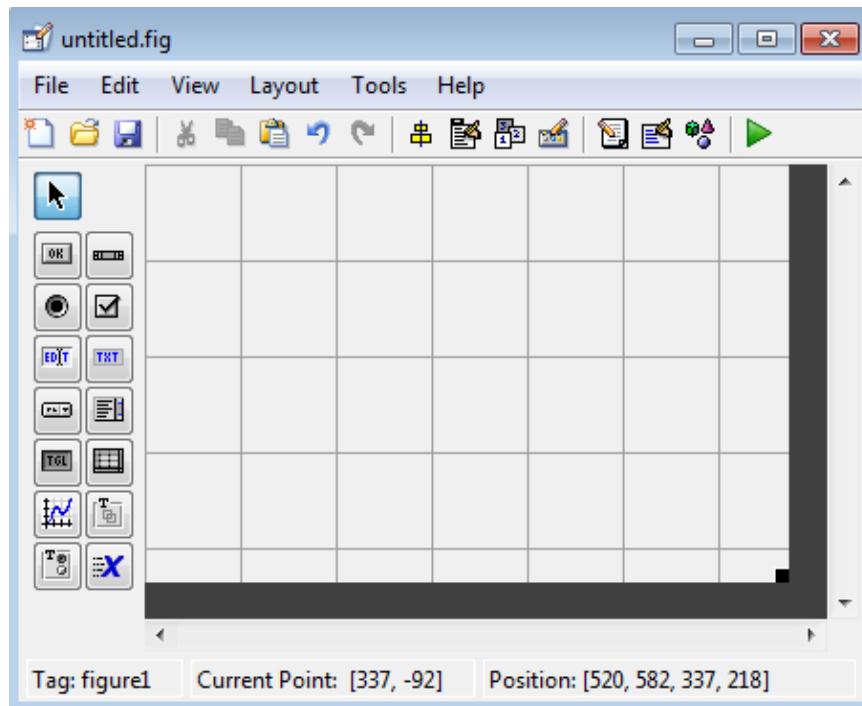


**Figura 8.3** Selector de GUI's

Seleccionando *Blank GUI (Default)* y pulsando Ok se llega al editor de interfaces desde el cual se puede trabajar tanto gráficamente como accediendo al código en lenguaje \*.m propio de Matlab.

Controles de la interfaz gráfica de usuario

Los controles de la interfaz con el usuario en MatLab se especifican con el comando uicontrol. Estos controles son similares a los menús de la interfaz con el usuario, aunque los controles tienen más opciones.



**Figura 8.4** Editor de la interfaz

Texto estático (StaticText): El texto estático puede exhibir símbolos, mensajes o incluso valores numéricos en una GUI y puede colocarse en el lugar apropiado. Este control no tiene cadena de invocación.

Menú desplegable (popupmenu): Estos menús desplegables difieren de los menús de interfaz con el usuario en que pueden aparecer en cualquier punto del panel, mientras que los menús de interfaz con el usuario solo se encuentran en la parte superior de la ventana.



Botón (pushbutton): Los botones son pequeños objetos de la pantalla generalmente acompañados con texto. Al presionar el botón con el ratón, se producirá una acción que será ejecutada por Matlab.

Casilla de verificación (checkbox): Las casillas están diseñadas para realizar operaciones de encendido/apagado.

Botón de radio (radiobutton): Cuando se usa un solo botón de radio, es igual que la casilla de verificación. Sin embargo, cuando se usan en grupo, estos son mutuamente exclusivos, es decir, si un botón de radio está encendido, los demás estarán apagados, mientras que las casillas de verificación son independientes entre sí.

Control deslizante (slider): Es un dispositivo que permite modificar un parámetro de forma continua.

Texto editable (editText): El dispositivo de texto editable le permite al usuario introducir una cadena. Puede aceptar valores numéricos en forma de vector o matriz como una cadena mediante el mismo dispositivo. La cadena de entrada puede convertirse a valores numéricos mediante la instrucción `str2num`.

Uso de varios ejes para graficación (Axis): Generalmente es necesario desplegar varias gráficas dentro de una interfaz. El comando `axes` abre un eje (gráfica) en un punto específico dentro de un panel.

Una vez editado de forma gráfica la interfaz se podrá acceder al código asociado a la interfaz creada.

## 8.3 Herramienta CicloSim

En este capítulo se procede a explicar la interfaz de usuario creada en este proyecto que permita simular la autonomía de vehículos eléctricos. Se pueden distinguir dos partes claramente diferenciadas que se han estudiado en este proyecto por tratarse de formas distintas de conseguir modelar un vehículo eléctrico:

- Modelado de las fuerzas actuantes sobre el vehículo y de la descarga de la batería programando las interacciones de las fuerzas en lenguaje \*.m para poder hacer el cálculo de todos los parámetros de forma recursiva.
- Modelado mediante Simulink con el uso de la técnica ERM descrita en capítulos anteriores de este proyecto.

El objetivo de la interfaz es permitir al usuario realizar simulaciones de los diferentes parámetros que pueden variar en el dimensionamiento de un vehículo eléctrico por diferentes modos, y a su vez controlar mediante la interfaz complejos modelos de Simulink creados por personal cualificado en la materia.

La interfaz desde la cual acceder a todas las opciones se encuentra en el archivo Ciclosim.fig. Debe abrirse desde Matlab para evitar posibles fallos y una vez abierta presenta el siguiente aspecto:



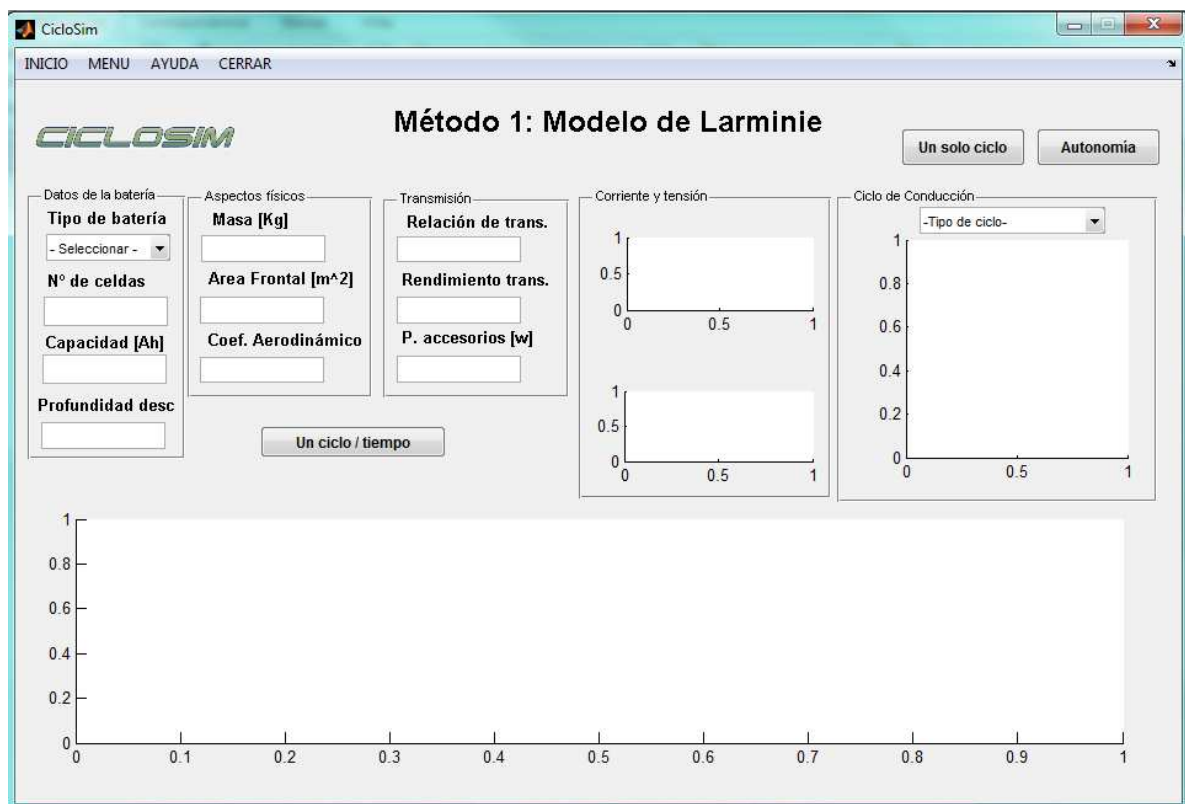
**Figura 8.5** Interfaz principal del proyecto



Esta es la primera pantalla que se encuentra al ejecutar la aplicación y en ella se puede ver en la parte superior un menú donde se proporciona información sobre el programa y en la parte derecha los botones para acceder a las opciones posibles para realizar las simulaciones.

## 8.4 Método 1: Modelo de Larminie.

En este caso, se han utilizado todas las fuerzas actuantes sobre un vehículo eléctrico y han sido programadas en el lenguaje propio de Matlab. Mediante el establecimiento de una serie de parámetros en la interfaz, el programa realizará los cálculos oportunos para calcular la autonomía teórica del vehículo.



**Figura 8.6** Interfaz del modelo de batería de Larminie

Los parámetros más significativos que se han escogido para realizar las simulaciones corresponden a las magnitudes más comunes entre distintos tipos vehículos. Estas magnitudes tienen carácter variable para cada vehículo y por

esa razón no pueden ser establecidas como una constante dentro del programa y se deben introducir por la interfaz. Las magnitudes constantes son establecidas dentro del correspondiente código asociado a esta interfaz.

Por considerarse los aspectos constructivos de mayor relevancia a la hora del diseño, las variables escogidas para ser introducidas por la interfaz son las siguientes:

Tipo de batería: Hace referencia a la tecnología de batería escogida. Mediante un menú desplegable se podrá escoger la opción adecuada a nuestras necesidades. Las opciones disponibles serán: Plomo-Ácido, Niquel-Cadmio y Litio-Ion. Según la opción escogida, el programa establecerá el valor de tensión por cada celda y el valor máximo de profundidad de descarga alcanzable para cada tipo de tecnología (Dod max).<sup>2</sup>

Nº de celdas: Número de elementos que componen el conjunto de la batería. Se supondrá una configuración en serie de las celdas, obteniendo el valor de tensión total del conjunto multiplicando el número de celdas por el valor de tensión de cada celda.

Capacidad: El valor de la capacidad corresponde a la capacidad total del conjunto de la batería y su magnitud será expresada en AmperiosHora.

Potencia de los accesorios: Todos los elementos eléctricos a bordo del vehículo consumirán la energía necesaria para su funcionamiento de la batería principal del vehículo. Por la naturaleza de los mismos, no todos estos elementos estarán funcionando al mismo tiempo y este valor tiene que ser supuesto en función de los accesorios disponibles.

Masa del vehículo: Entendiéndose por tal la suma de la masa del propio vehículo con todos sus elementos más la masa correspondiente al conjunto de las baterías. Esta unidad debe ser expresada en kilogramos.

Área frontal: Es el producto de la longitud de eje por la altura del vehículo, ambas unidades expresadas en metros y el resultado en metros cuadrados.

Coeficiente aerodinámico: Para vehículos eléctricos se establece un coeficiente aerodinámico en un rango comprendido entre 0.12 y 0.3.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Los valores de profundidad de descarga establecidos según el tipo de batería son los establecidos en el capítulo 3, tabla 3.1

<sup>3</sup> *Electric Vehicle Technology Explained* James Larminie and John Lowry

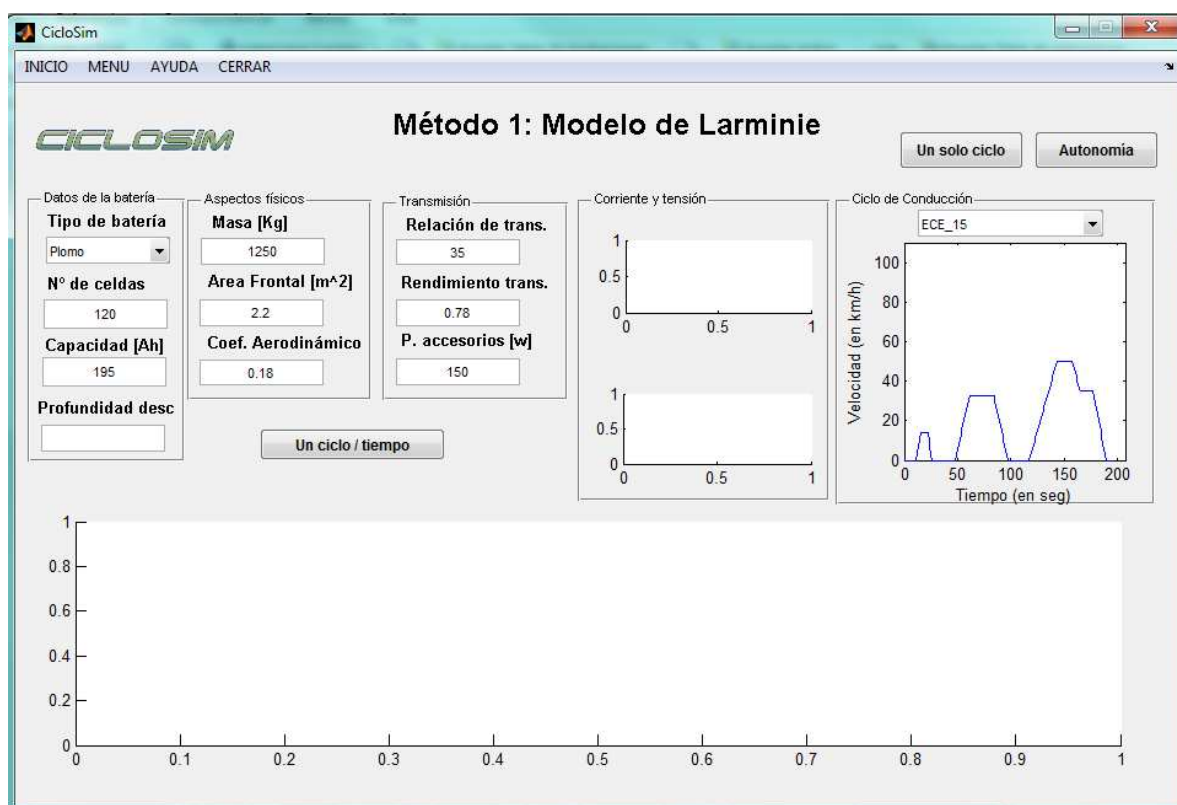
**Relación de transmisión:** Relación de proporcionalidad establecida entre la velocidad en el eje de giro del motor eléctrico y las ruedas.

**Rendimiento de la transmisión:** Este factor multiplica la potencia en el eje del motor para obtener la potencia que las ruedas transmiten al suelo.

**Ciclo de conducción:** Mediante el uso del menú desplegable programado al uso se podrá seleccionar entre una serie de ciclos de conducción establecidos.

**Profundidad de descarga:** Nivel hasta el cual se va a permitir descargar la batería.<sup>4</sup>

Los parámetros variables desde la interfaz serán de la magnitud adecuada para poder proporcionar datos con cierta verosimilitud y en la medida de lo posible tratarán de asemejarse a datos reales o de mercado.



**Figura 8.7** Parámetros introducidos en la interfaz

<sup>4</sup> La profundidad de descarga será solamente introducida en caso de querer modificarla. Por defecto se establece una cierta profundidad de descarga en función de la tecnología de la batería. Para las baterías de plomo-ácido 0.5, para baterías de níquel 0.7 y para baterías de litio 0.8.

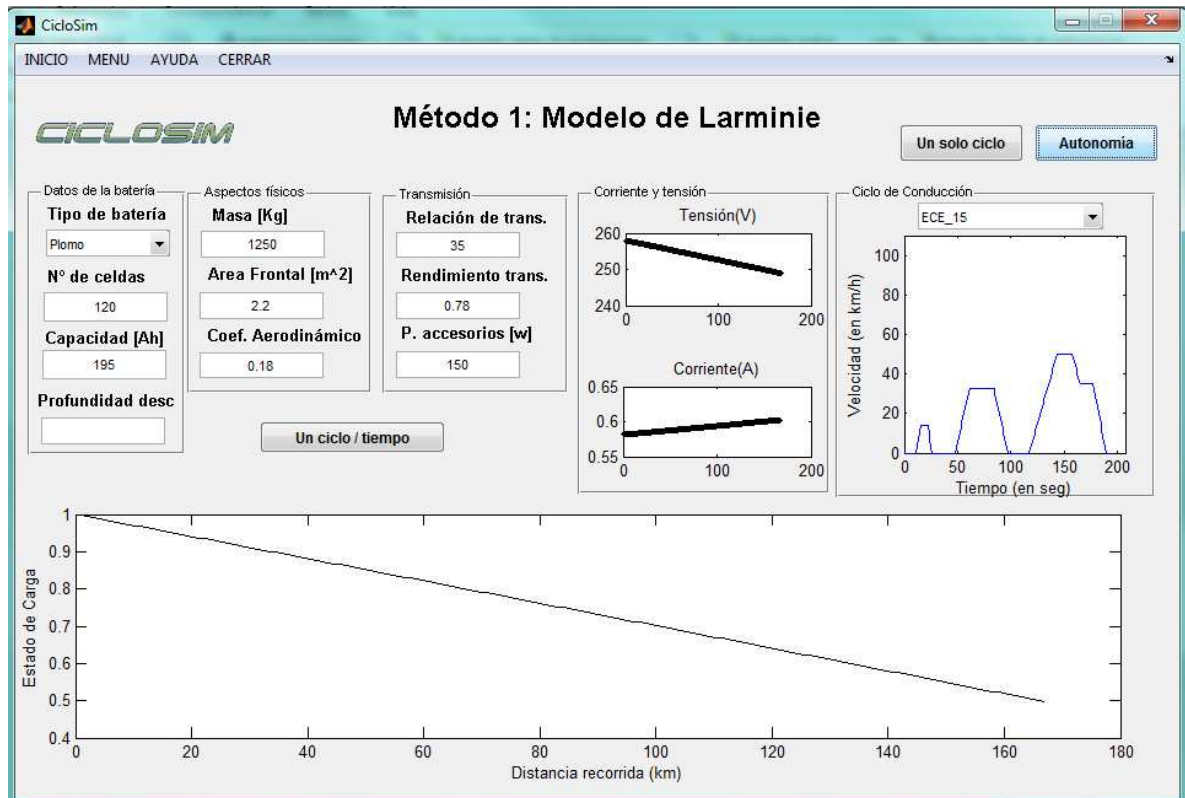
### Ejemplo de funcionamiento

Vamos a realizar un ejemplo de cómo se interactúa con la interfaz para conocer la autonomía de un vehículo. Establecemos los parámetros representativos del vehículo en la siguiente tabla:

Parámetro	Magnitud
Tipo de Batería	Plomo
Nº de Celdas	120 celdas
Capacidad	195 Ah
Potencia de accesorios	150 watos
Masa	1250 kg
Área frontal	2.2 m <sup>2</sup>
Coef. Aerodinámico	0.18
Relación de transmisión	35
Rendimiento de la transmisión	0.78
Ciclo de conducción	ECE_15

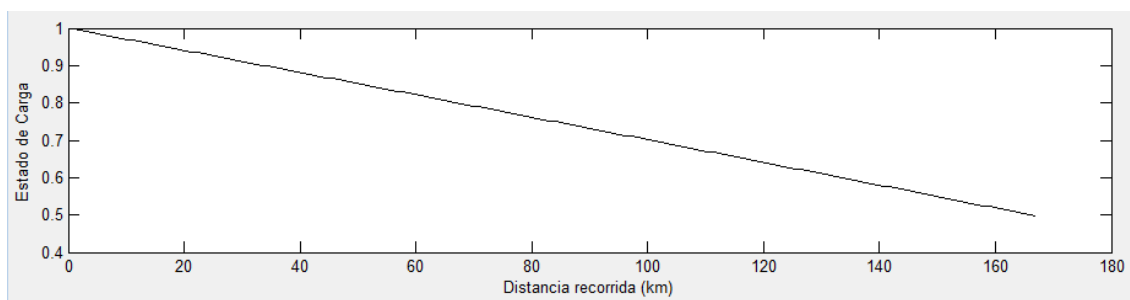
**Tabla 8.1** Parámetros de un vehículo

Una vez establecidos todos los parámetros, podremos ejecutar el programa para que realice los cálculos necesarios para la simulación pulsando sobre el botón “Autonomía”.



**Figura 8.8** Resultado de la simulación

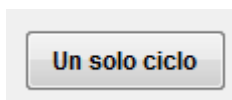
En la figura 8.8 se muestran los resultados de la simulación. Entrando en detalle, la forma escogida para representar los resultados ha sido graficar el estado de carga de la batería en función de la distancia recorrida, obteniéndose la gráfica que se muestra en la figura 8.9:



**Figura 8.9** Detalle de la descarga de la batería

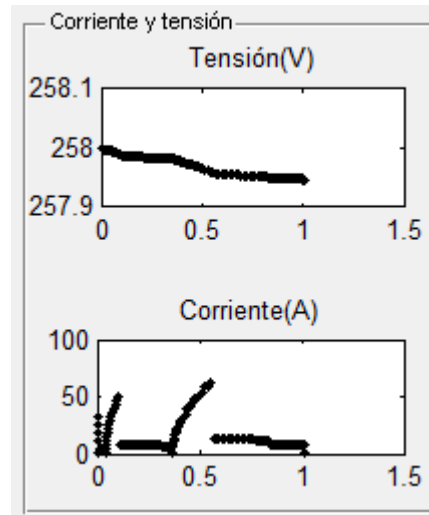
Se puede observar en la gráfica representada en la figura 8.9 como con los datos introducidos por la interfaz, el programa realiza los cálculos oportunos para poder representar la distancia recorrida en función del estado de carga de la batería. El último punto de la gráfica indica la máxima distancia recorrida llegando a un estado de carga del 50%.

Para un mayor detalle la aplicación permite que se realice la simulación de un solo ciclo para de esa forma obtener con mayor detalle las formas de onda de corriente y tensión en los diferentes puntos recorridos por el ciclo de conducción seleccionado. Para ello basta con pulsar sobre el siguiente botón:



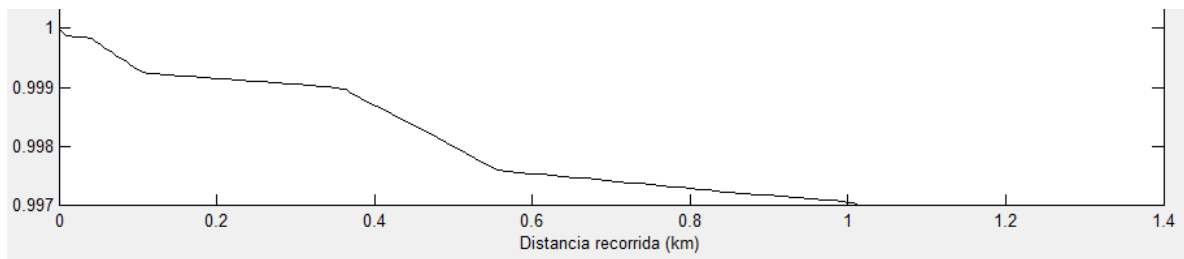
**Figura 8.10** Botón de un solo ciclo

De esta forma se obtienen las siguientes gráficas de corriente y tensión respecto a la distancia recorrida:



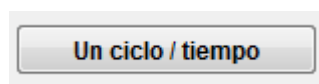
**Figura 8.11** Gráficas de tensión y corriente

La representación del estado de carga de la batería también se mostrará en función de la distancia recorrida para un solo ciclo:



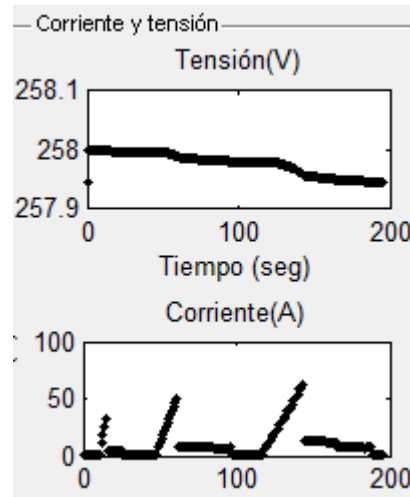
**Figura 8.12** Estado de carga respecto a la distancia recorrida en un solo ciclo

De forma complementaria para analizar el comportamiento en un solo ciclo, se permite al usuario representar las gráficas anteriores respecto del tiempo transcurrido en vez de la distancia recorrida, para ello bastaría con pulsar sobre el siguiente botón:



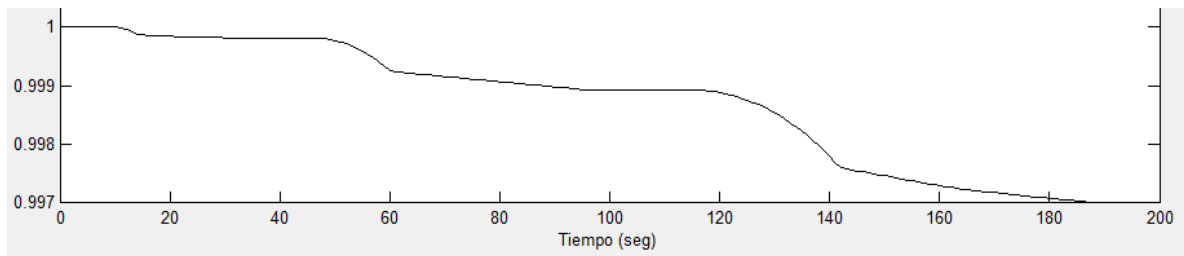
**Figura 8.13** Botón para representar respecto del tiempo

De la anterior acción se obtienen las mismas gráficas anteriores respecto del tiempo de simulación de un solo ciclo. Las gráficas obtenidas guardan las siguientes formas de onda:



**Figura 8.14** Gráficas de tensión y corriente en un solo ciclo de conducción respecto del tiempo de simulación

Por último también se obtiene la gráfica que representa el estado de carga respecto al tiempo de simulación obteniéndose la siguiente gráfica:



**Figura 8.15** Estado de carga a lo largo de la simulación de un ciclo de conducción ECE-15

## 8.5 Modelado mediante Simulink

En el ejemplo anterior se ha podido ver cómo es posible controlar un programa creado en Matlab (en su lenguaje \*.m) a través de una interfaz de forma sencilla sin tener que variar las constantes establecidas en el código del programa de forma manual. De la misma forma que se puede simular un vehículo programando el código necesario, también se puede representar el funcionamiento de un vehículo eléctrico con la herramienta Simulink tal y como hemos visto en el capítulo 6. Comprender todos y cada uno de los elementos que forman parte de un sistema tan complejo como es un vehículo eléctrico es

una tarea muy complicada para alguien ajeno al sistema elaborado. Para poder probar diferentes configuraciones sería necesario variar los diferentes parámetros de los bloques que componen el sistema pero esta labor es muy tediosa y en los casos en los que se desconozca el completo funcionamiento del modelo, puede ser peligroso para el correcto funcionamiento debido a su alta complejidad y al elevado número de variables que intervienen en el proceso.

Controlar todo ello desde una interfaz permite al usuario no tener que manipular desde Simulink las variables del proceso y de ese modo, las simulaciones se podrán llevar a cabo por personal sin conocimientos en la materia.

Debido a la falta de precedentes en la materia, se ha tenido que investigar cómo llevar a cabo el control de modelos de Simulink desde una interfaz pasando a explicar a continuación los pasos necesarios para el proceso.

#### - Control de Simulink desde GUIDE

Cuando se crea una interfaz de usuario, tal y como hemos visto, se crea un archivo con el código asociado a esa interfaz permitiendo interactuar con las acciones programadas al efecto. Esta forma de interactuar con un programa desde una interfaz es el ejemplo que se ha descrito anteriormente. Pero uno de los objetivos de este proyecto es llegar a controlar desde la interfaz complejos modelos de Simulink y por esa razón se ha estudiado esta opción.

Desde GUIDE se puede abrir y ejecutar modelos de Simulink (\*.mdl) con el uso de los comandos:

```
%Lo abrimos
open_system('EV_dcm_IP');
%Damos al play para hacer funcionar simulink
set_param(gcs,'SimulationCommand','Start');
```

Esto permite que se pueda abrir el modelo descrito, y que a continuación se ejecute (esto equivaldría a darle al *play* en las opciones de la ventana de Simulink). El inconveniente de esta opción está en que no permite variar los parámetros presentes en los diferentes bloques y por lo tanto las simulaciones realizadas desde la interfaz solo serían válidas para los valores establecidos en el modelo. La opción deseada es establecer el valor de las variables del modelo de Simulink desde la interfaz, pero GUIDE no permite realizar esta tarea de forma sencilla, por esa razón se ha adoptado una solución alternativa que lo permita. Para llevar a cabo un amplio control de los elementos del modelo se han seguido los siguientes pasos:



- Dentro de cada elemento de Simulink, a la hora de configurar cada uno de los parámetros, estos serán nombrados con el nombre de la variable pertinente y no con el valor numérico. Esto es así para poder tomar el valor asignado a esa variable más adelante.
- Desde la interfaz, se introducen los valores deseados y mediante el tratamiento adecuado por medio del correspondiente código esa variable es enviada al Workspace donde queda almacenada.  
Con el siguiente fragmento de código se puede ver como se establecen las variables que han sido introducidas en los correspondientes edit.Text del menú de la interfaz.

```
% - - Batería - -  
Nceldas = handles.edit1;  
Capacidad = handles.edit2;
```

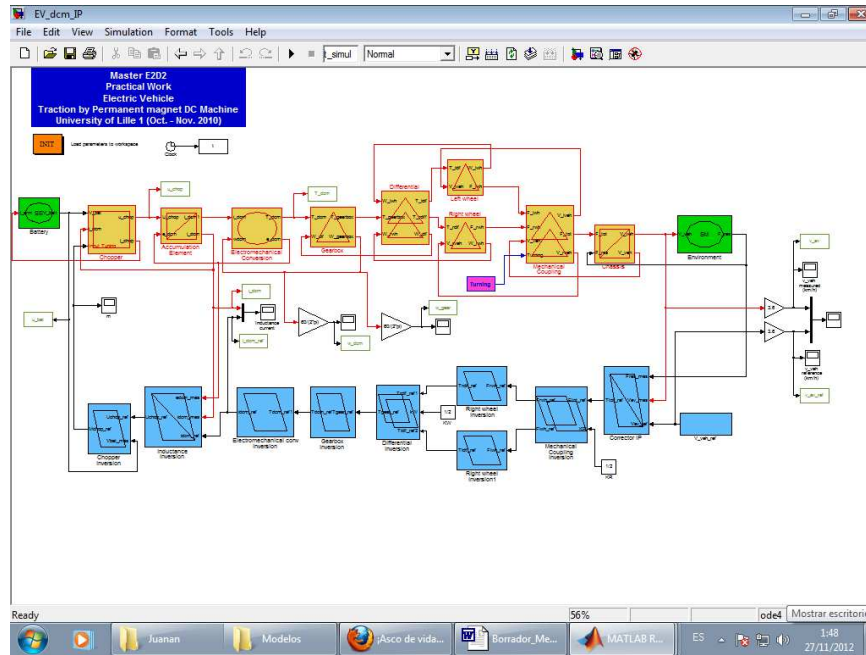
Una vez establecidas las variables, son enviadas al Workspace con el siguiente fragmento de código:

```
%Mandamos los datos al workspace:  
%Tanto los introducidos como las constantes  
assignin('base','Nceldas',Nceldas);  
assignin('base','Capacidad',Capacidad);
```

- Una vez establecidas todas las variables en el Workspace se procede a ejecutar el modelo de Simulink especificado. Este modelo debe encontrarse en la misma carpeta en la que se encuentren el resto de archivos correspondientes a la interfaz. Las funciones utilizadas en Matlab para poder realizar esta tarea se pueden ver a continuación:

```
%Control de simulink  
%Buscamos el modelo de simulink  
find_system('Name','EV_dcm_IP');  
%Lo abrimos  
open_system('EV_dcm_IP');  
%Damos al play para hacer funcionar simulink  
set_param(gcs,'SimulationCommand','Start');
```

- Tras ser ejecutado el modelo de Simulink, este aparecerá por pantalla y comenzará la simulación

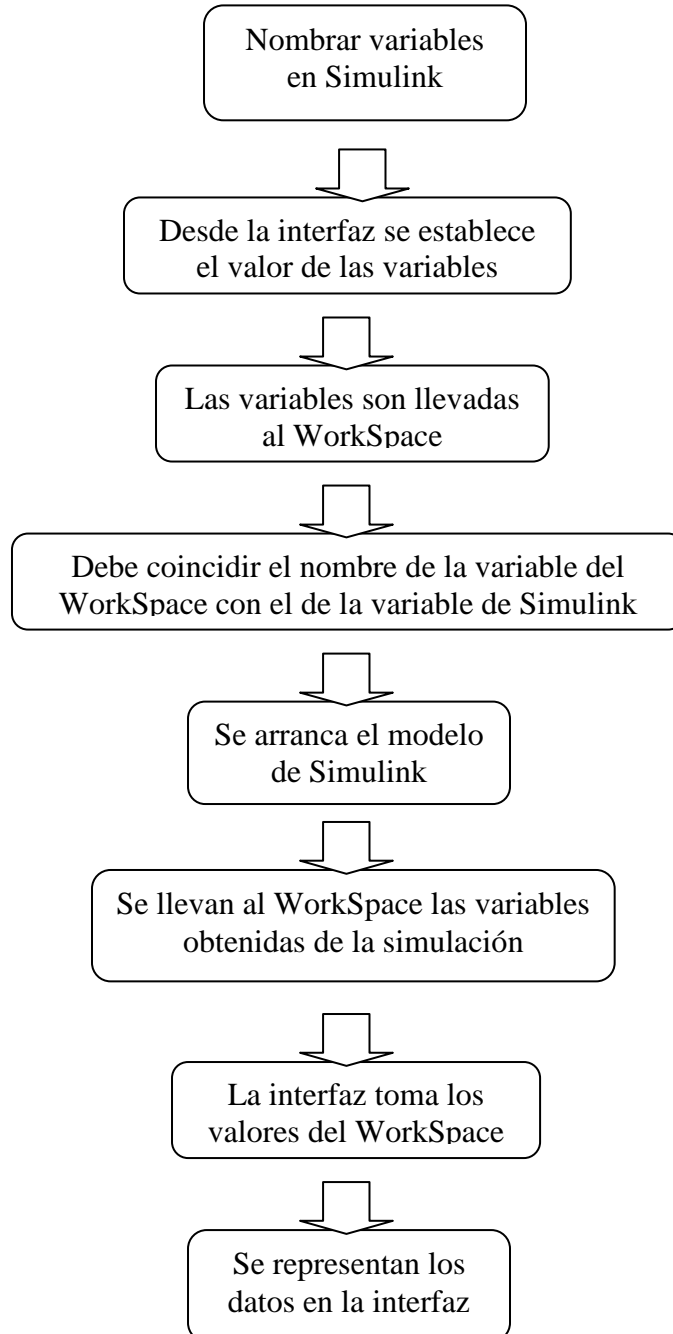


**Figura 8.16** Representación del vehículo en Simulink

- Una vez realizada la simulación, las señales de mayor interés son llevadas al Workspace. Para ello basta con conectar la etiqueta “Save to Workspace” correspondiente a la señal de interés según el caso:
- Finalizada la simulación y con todas las variables necesarias para elaborar el análisis oportuno disponibles en el Workspace se procede a tomar esas variables para poder operar con ellas en la interfaz. Para ello, el código necesario para tomar esas variables es el siguiente:

```
ibat = evalin('base','I_bateria');
ubat = evalin('base','u_bat');
```

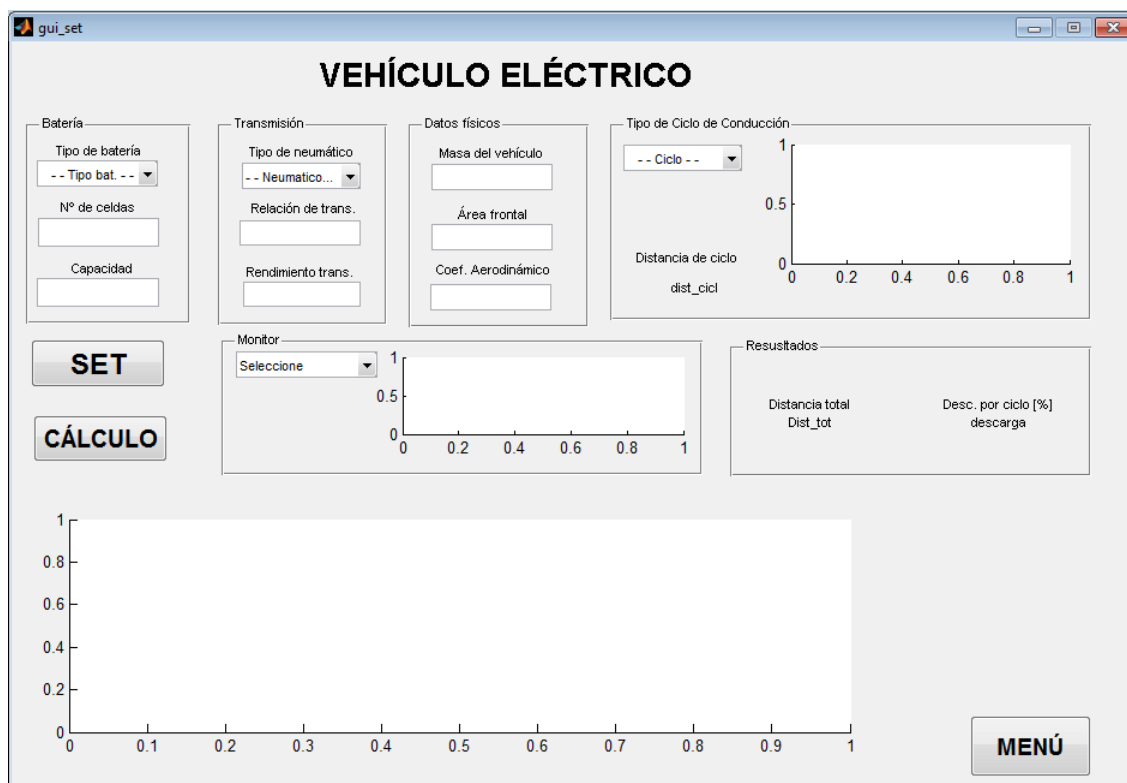
Una forma sencilla de comprender el proceso seguido para realizar el tratamiento adecuado de las variables entre Simulink y la interfaz se explica a continuación con un sencillo diagrama:



**Figura 8.17** Flujo de los pasos seguidos

## Presentación de la interfaz

El aspecto que presenta la interfaz que controla los modelos de Simulink usados presenta un aspecto muy similar a la interfaz del ejemplo anterior.



**Figura 8.18** Interfaz del modelo de Simulink

No todas las variables del ejemplo anterior están disponibles en el modelado de Simulink del vehículo eléctrico. Por considerarse los aspectos constructivos de mayor relevancia entre los disponibles, las variables escogidas para ser introducidas por la interfaz son las siguientes:

Tipo de batería: Hace referencia a la tecnología de batería escogida. Mediante un menú desplegable se podrá escoger la opción adecuada a nuestras necesidades. Las opciones disponibles serán: Plomo-Ácido, Niquel-Cadmio y Litio-Ion. Según la opción escogida, el programa establecerá el valor de tensión por cada celda y el valor máximo de profundidad de descarga alcanzable para cada tipo de tecnología (Dod max).

Nº de celdas: Número de elementos que componen el conjunto de la batería. Se supondrá una configuración en serie de las celdas, obteniendo el valor de tensión total del conjunto multiplicando el número de celdas por el valor de tensión de cada celda.

Capacidad: El valor de la capacidad corresponde a la capacidad total del conjunto de la batería y su magnitud será expresada en AmperiosHora.

Tipo de neumático: En función del tipo de neumático escogido se asignará un radio a la rueda. Este valor es necesario para conocer la velocidad transmitida a la superficie desde el eje de giro de la rueda.

Relación de transmisión: Relación de proporcionalidad establecida entre la velocidad en el eje de giro del motor eléctrico y las ruedas.

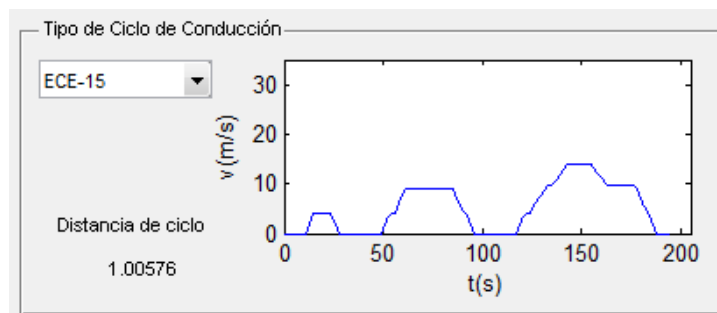
Rendimiento de la transmisión: Este factor multiplica la potencia en el eje del motor para obtener la potencia que las ruedas transmiten al suelo.

Masa del vehículo: Entendiéndose por tal la suma de la masa del propio vehículo con todos sus elementos más la masa correspondiente al conjunto de las baterías. Esta unidad debe ser expresada en kilogramos.

Área frontal: Es el producto de la longitud de eje por la altura del vehículo, ambas unidades expresadas en metros y el resultado en metros cuadrados.

Coeficiente aerodinámico: Para vehículos eléctricos se establece un coeficiente aerodinámico en un rango comprendido entre 0.12 y 0.3

Ciclo de conducción: Mediante el uso del menú desplegable programado al uso se podrá seleccionar entre una serie de ciclos de conducción establecidos.



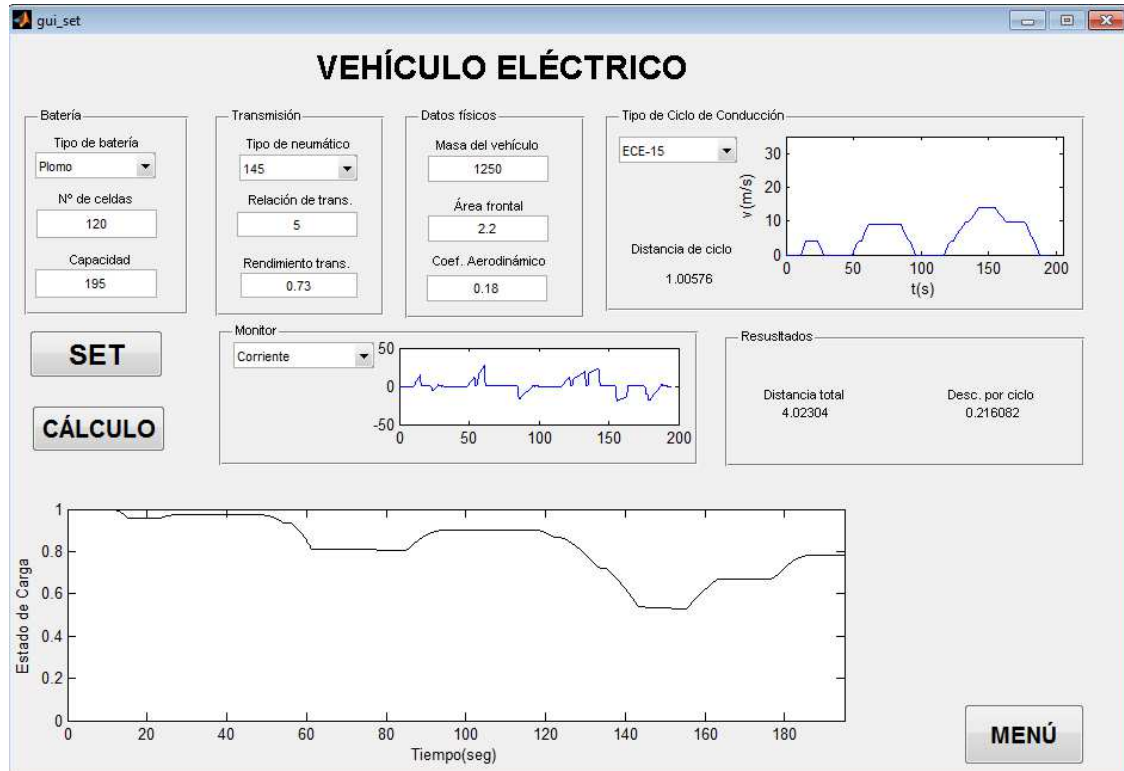
**Figura 8.19** Detalle del ciclo de conducción seleccionado

Los parámetros variables desde la interfaz serán de la magnitud adecuada para poder proporcionar datos con cierta verosimilitud y en la medida de lo posible tratarán de asemejarse a datos reales o de mercado.

La ejecución del programa debe hacerse en dos pasos:

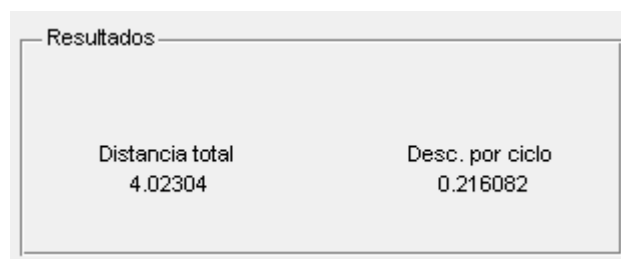
- Con el botón SET se mandan las variables al WorkSpace y se ejecuta la simulación.
- Con el botón CÁLCULO se toman los valores del WorkSpace y se realizan los cálculos oportunos.

Los datos obtenidos de la simulación se representarán en los apartados correspondientes de la interfaz quedando esta de la siguiente forma para un caso de ejemplo:



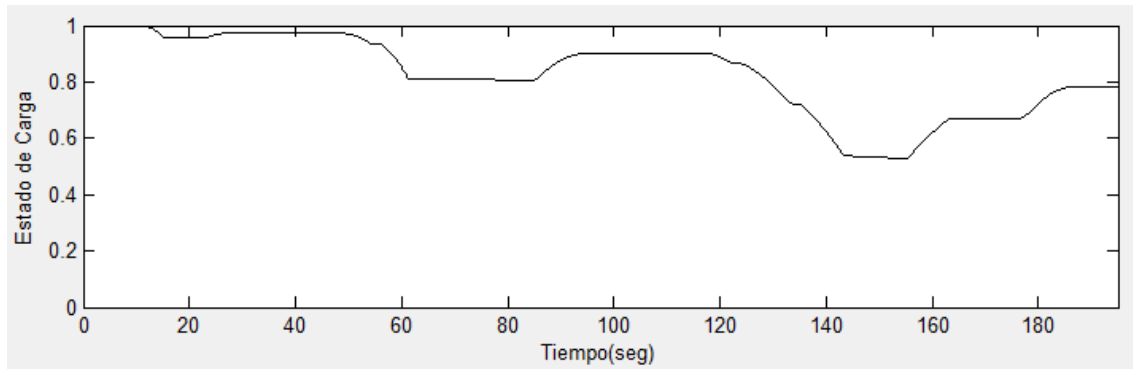
**Figura 8.20** Resultado de la simulación

En el panel de resultados se representa la distancia total recorrida total por el vehículo y la porción de descarga que se produce en la batería al recorrer una vez el ciclo seleccionado:



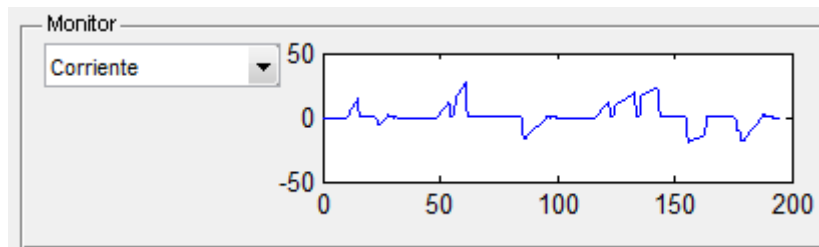
**Figura 8.21** Panel de resultados

Gráficamente se puede representar por un lado la forma de la descarga que se produce en la batería a lo largo de un ciclo. En el eje Y se representará el estado de carga de la batería y en el eje X el tiempo que dura el ciclo seleccionado.



**Figura 8.22** Descarga de la batería en un ciclo

También se encuentra disponible la opción de seleccionar con un menú desplegable la forma de onda de la corriente demandada a la batería o la tensión que proporciona al sistema:



**Figura 8.23** Detalle de la corriente

## Capítulo 9

# Presentación de resultados

## 9.1 Introducción

La predicción del comportamiento de un vehículo eléctrico, como hemos podido ver a lo largo de este proyecto no deja de ser un valor teórico obtenido por una serie de cauces, pero a la hora de aplicar estos resultados de forma práctica se precisa que las simulaciones guarden una cierta semejanza con casos reales. Cuanto mayor sea la semejanza mayor será la fiabilidad y la utilidad en la aplicación como herramienta de diseño de vehículos eléctricos.

La mejor forma de comprobar la utilidad real de una simulación es conseguir comparar los resultados virtuales con datos reales. Debido a la dificultad que supone realizar estas pruebas con modelos de vehículos reales se ha adoptado la solución de tomar los datos técnicos de los vehículos del Catálogo Movele por contener una amplia gama de vehículos de diferentes características y ser datos agrupados por una entidad oficial.

## 9.2 Catalogo Movele

El Proyecto MOVELE es un programa gestionado y coordinado desde el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) perteneciente al Ministerio de Industria, Energía y Turismo, que persigue la introducción dentro de entornos urbanos, de vehículos eléctricos de diversas categorías, prestaciones y tecnologías, en un amplio colectivo de empresas, instituciones y particulares, así como la instalación de puntos de recarga para estos vehículos. El Proyecto se enmarca en el Plan de Activación del Ahorro y la Eficiencia Energética 2008-2011 aprobado en el Consejo de Ministros de Agosto de 2008, por el que encarga a IDAE la puesta en marcha de un proyecto piloto de introducción de vehículos eléctricos.

La parte del Proyecto Movele aplicable a este proyecto es el catálogo de vehículos encuadrados dentro del plan de ayudas. En dicho catalogo se desglosa un listado de vehículos eléctricos desde ciclomotores hasta vehículos industriales presentes en el mercado todos ellos acompañados de su ficha técnica. Dentro de la ficha técnica, se prestará especial atención a los parámetros usados en la herramienta desarrollada y su aplicación al uso. Los parámetros tomados de las diferentes fichas técnicas de cada vehículo que serán usados para llevar a cabo las diferentes simulaciones serán:



- Tipo de batería
- Capacidad
- Tensión
- Masa del vehículo
- Área frontal

A pesar de encontrar una detallada ficha técnica por cada vehículo, se precisan una serie de datos para poder llevar a cabo la simulación que no son proporcionados ni por el fabricante ni en el catálogo Movele. En esos casos, el uso de esos parámetros será variable entre valores estandarizados para poder llevar a cabo el ajuste adecuado hasta conseguir que los datos de la simulación se ajusten a los reales. Dichos parámetros de ajuste serán:

- Relación de transmisión.
- Rendimiento de la transmisión.
- Profundidad de descarga máxima.

La comparativa se llevará a cabo tratando de hacer coincidir el valor de la autonomía del vehículo (cuyo dato tomamos del catálogo Movele) con la autonomía calculada con la aplicación en función de los parámetros de entrada anteriormente descritos.

Debido a la complejidad de los sistemas que intervienen en los vehículos de turismo comercializados a gran escala (vehículos tipo Toyota Prius, Nissan Leaf, etc.) las simulaciones se han realizado para cuadríciclos eléctricos por considerar que por la sencillez de su fabricación es más fácil acotar las magnitudes de los parámetros que modelan su funcionamiento.

## 9.3 Caso 1



**Figura 9.1** Vehículo Global Electric Motorcars – Caso 1

Datos del vehículo:

Fabricante	Global Electric Motorcars, LLC
Marca	GEM
Modelo	e4
Versión	4 Pasajeros
Segmento/Categoría	Cuadriciclo
Tipo	L7e

**Tabla 9.1** Datos vehículo caso 1<sup>5</sup>

El ajuste de la simulación se ha realizado tomando los siguientes valores por considerarse los más aproximados a los proporcionados por la ficha técnica:

<b>Método 1</b>		<b>Método 2</b>	
Tipo de batería	Plomo-Ácido	Tipo de batería	Plomo-Ácido
Nº de celdas	35	Nº de celdas	34
Capacidad (Ah)	98	Capacidad (Ah)	98
Tensión (v)	75.25	Tensión (v)	74.8
P. accesorios (w)	15	Tipo de Neumático	145
Masa (kg)	583	Relación de transmisión	10
Área frontal	2.2	Rendimiento de la transmisión	0.95
Coef. Aerodinámico	0.2	Masa (kg)	583
Relación de transmisión	30	Área frontal	2.2
Rendimiento de la transmisión	0.95	Coef. Aerodinámico	0.12
Ciclo de conducción	ECE-15	Ciclo de conducción	ECE-15

**Tabla 9.2** Parámetros de ajuste caso 1

La simulación se realizará por los dos métodos desarrollados al uso en la aplicación.

<sup>5</sup> Se dispone de la ficha técnica completa del vehículo en los anexos.

Método 1:

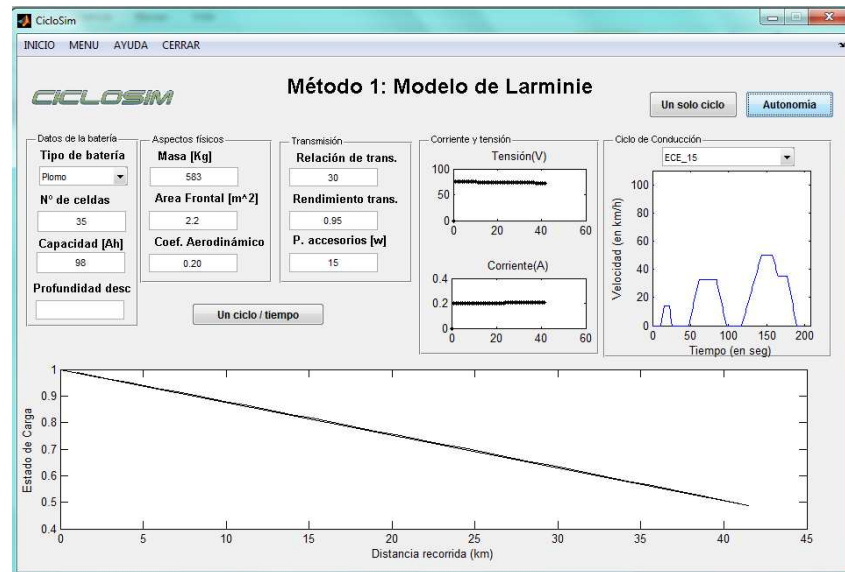


Figura 9.2 Caso 1, Resultado método 1. Distancia recorrida: 43Km.

Método 2:

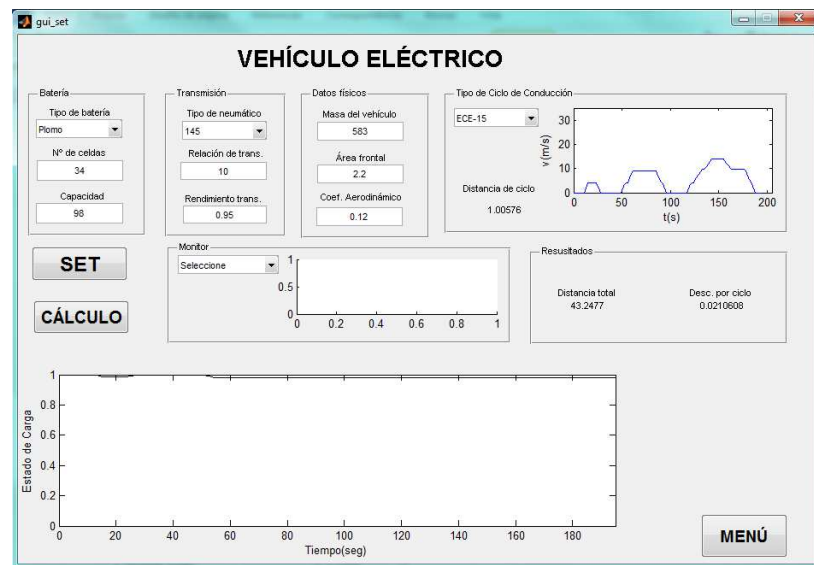


Figura 9.3 Caso 1, Resultado método 2. Distancia recorrida: 43.2Km.

## 9.4 Caso 2



**Figura 9.4** Vehículo Beepo Electric – Caso 2<sup>6</sup>

Datos del vehículo:

Denominación	
Fabricante	BEEPO ELECTRIC VEHICLES
Marca	BEEPO ELECTRIC VEHICLES
Modelo	BEEPO PONY PICK UP
Versión	PICK UP
Segmento/Categoría	Cuadriciclo/ L7e
Tipo	Vehículo Eléctrico (BEV)

**Tabla 9.3** Datos vehículo caso 2

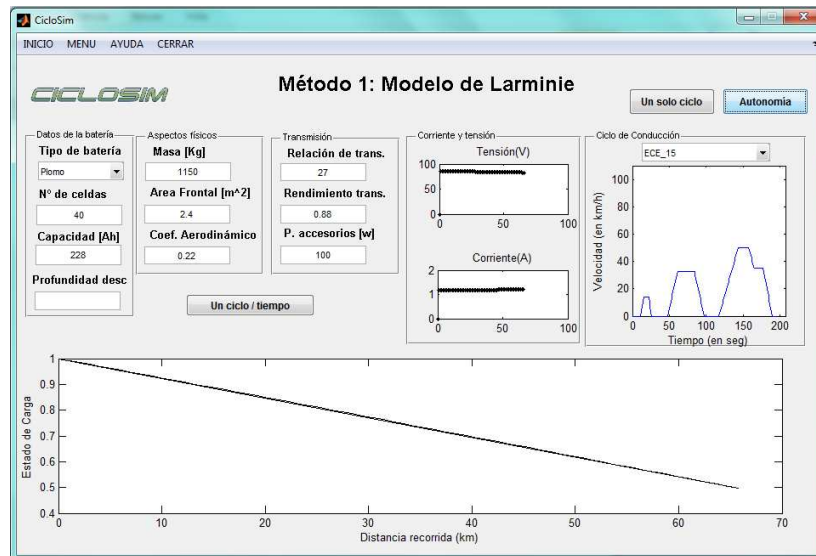
El ajuste de la simulación se ha realizado tomando los siguientes valores por considerarse los más aproximados a los proporcionados por la ficha técnica:

<b>Método 1</b>		<b>Método 2</b>	
Tipo de batería	Plomo-Ácido	Tipo de batería	Plomo-Ácido
Nº de celdas	40	Nº de celdas	40
Capacidad (Ah)	228	Capacidad (Ah)	228
Tensión (v)	86	Tensión (v)	86
P. accesorios (w)	100	Tipo de Neumático	145
Masa (kg)	1150	Relación de transmisión	12
Área frontal	2.4	Rendimiento de la transmisión	0.98
Coef. Aerodinámico	0.22	Masa (kg)	1150
Relación de transmisión	27	Área frontal	1.4
Rendimiento de la transmisión	0.88	Coef. Aerodinámico	0.12
Ciclo de conducción	ECE-15	Ciclo de conducción	ECE-15

**Tabla 9.4** Parámetros de ajuste caso 2

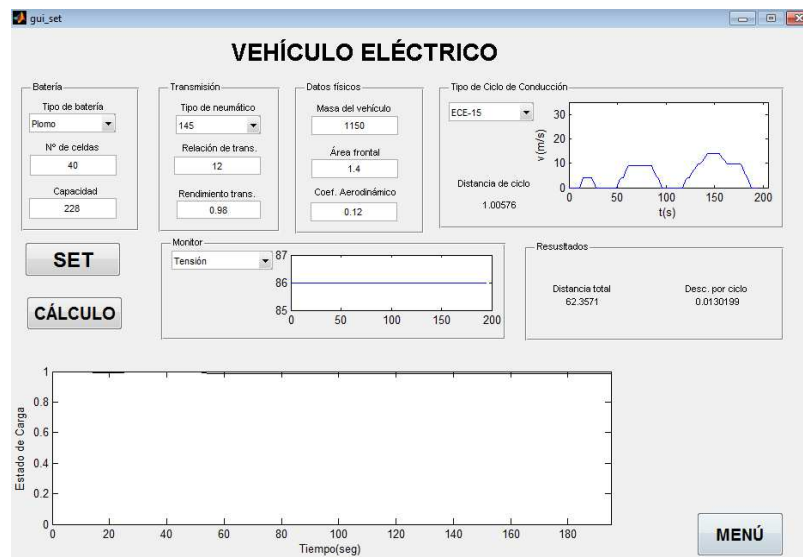
<sup>6</sup> Se dispone de la ficha técnica completa del vehículo en los anexos.

## Método 1



**Figura 9.5** Caso 2, Resultado método 1. Distancia recorrida: 66Km.

## Método 2



**Figura 9.6** Caso 2, Resultado método 2. Distancia recorrida: 62.357Km.

## 9.5 Caso 3



**Figura 9.7** Vehículo FAAM/EVF SMILE – Caso 3

Datos del vehículo:

Denominación	
Fabricante	
Marca	
Modelo	
Versión	PICK UP
Segmento/Categoría	Cuadriciclo/ L7e
Tipo	Vehículo Eléctrico (BEV)

**Tabla 9.5** Datos vehículo caso 3<sup>7</sup>

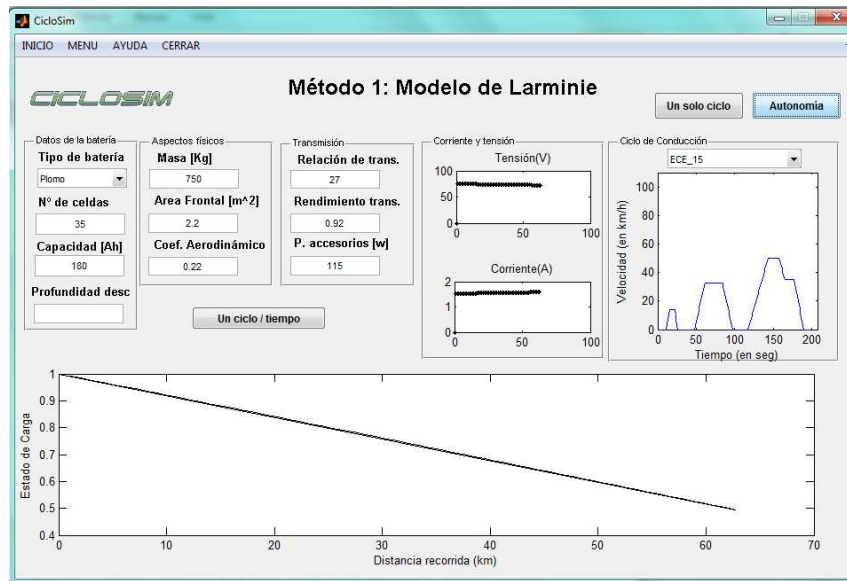
El ajuste de la simulación se ha realizado tomando los siguientes valores por considerarse los más aproximados a los proporcionados por la ficha técnica:

<b>Método 1</b>		<b>Método 2</b>	
Tipo de batería	Plomo-Ácido	Tipo de batería	Plomo-Ácido
Nº de celdas	35	Nº de celdas	34
Capacidad (Ah)	180	Capacidad (Ah)	180
Tensión (v)	73	Tensión (v)	71
P. accesorios (w)	115	Tipo de Neumático	145
Masa (kg)	750	Relación de transmisión	10
Área frontal	2.2	Rendimiento de la transmisión	0.95
Coef. Aerodinámico	0.22	Masa (kg)	750
Relación de transmisión	27	Área frontal	2.2
Rendimiento de la transmisión	0.92	Coef. Aerodinámico	0.12
Ciclo de conducción	ECE-15	Ciclo de conducción	ECE-15

**Tabla 9.6** Parámetros de ajuste caso 3

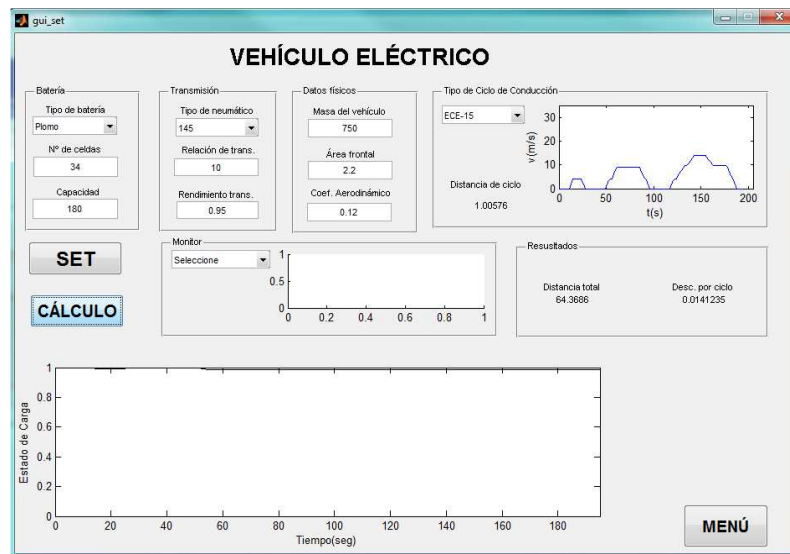
<sup>7</sup> Se dispone de la ficha técnica completa del vehículo en los anexos.

## Método 1



**Figura 9.8** Caso 3, Resultado método 1. Distancia recorrida: 63 km.

## Método 2



**Figura 9.9** Caso 3, Resultado método 2. Distancia recorrida: 64.37Km.

## 9.6 Caso 4



**Figura 9.10** Vehículo MELEX – Caso 4

Datos del vehículo:

Denominación	
Fabricante	
Marca	
Modelo	
Versión	PICK UP
Segmento/Categoría	Cuadriciclo/ L7e
Tipo	Vehículo Eléctrico (BEV)

**Tabla 9.7** Datos vehículo caso 4<sup>8</sup>

El ajuste de la simulación se ha realizado tomando los siguientes valores por considerarse los más aproximados a los proporcionados por la ficha técnica:

<b>Método 1</b>		<b>Método 2</b>	
Tipo de batería	Plomo-Ácido	Tipo de batería	Plomo-Ácido
Nº de celdas	33	Nº de celdas	33
Capacidad (Ah)	232	Capacidad (Ah)	232
Tensión (v)	68	Tensión (v)	68
P. accesorios (w)	138	Tipo de Neumático	145
Masa (kg)	710	Relación de transmisión	8
Área frontal	2.2	Rendimiento de la transmisión	0.90
Coef. Aerodinámico	0.23	Masa (kg)	710
Relación de transmisión	27	Área frontal	2.04
Rendimiento de la transmisión	0.80	Coef. Aerodinámico	0.12
Ciclo de conducción	ECE-15	Ciclo de conducción	ECE-15

**Tabla 9.8** Parámetros de ajuste caso 4

<sup>8</sup> Se dispone de la ficha técnica completa del vehículo en los anexos.



## Método 1

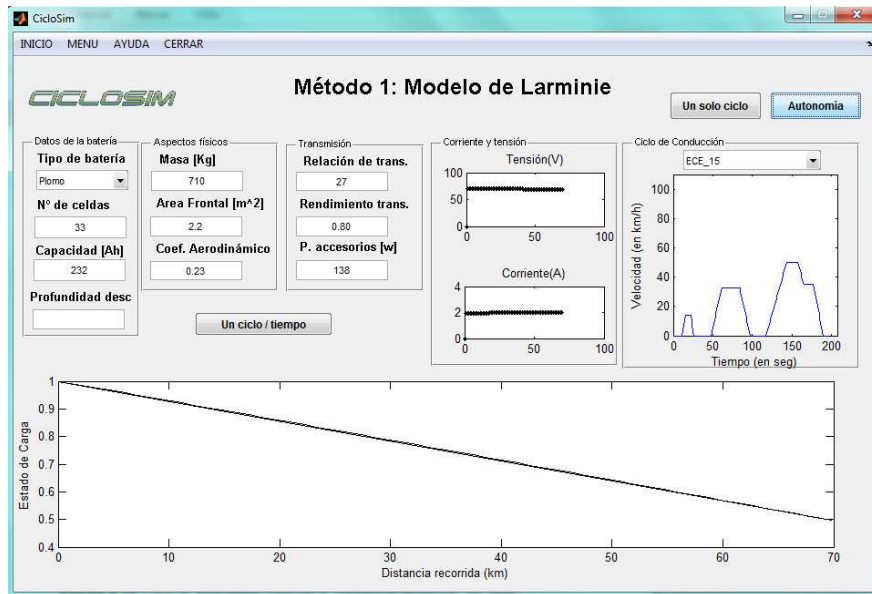


Figura 9.11 Caso 4, Resultado método 1. Distancia recorrida: 70Km.

## Método 2

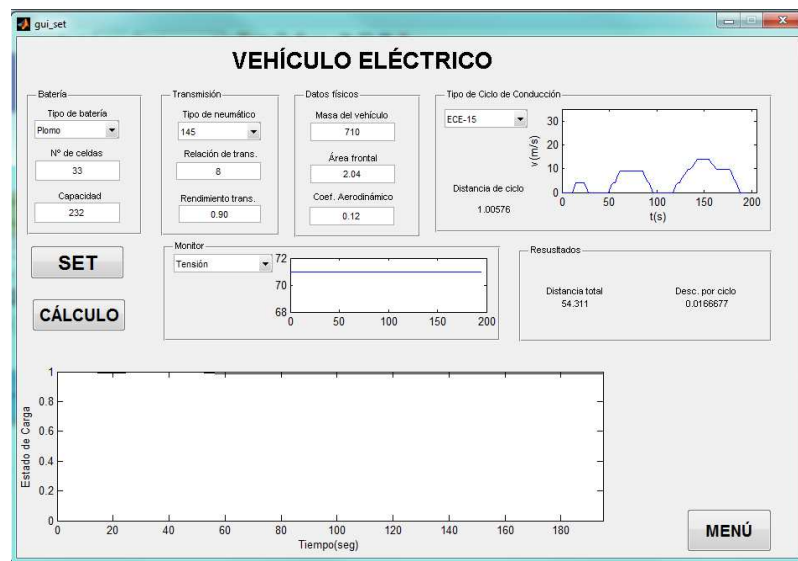


Figura 9.12 Caso 4, Resultado método 2. Distancia recorrida: 54.3Km.

## 9.7 Resumen de resultados obtenidos

Tras la comprobación de las simulaciones descritas anteriormente, se resume a continuación la comparativa de las autonomías conseguidas con las diferentes simulaciones en comparación con los datos aportados por las fichas técnicas de los vehículos comprobados.

	<b>Autonomía oficial (km)</b>	<b>Método 1 (km)</b>	<b>Método 2 (km)</b>
<b>Caso 1</b>	45	43	43.2
<b>Caso 2</b>	75	66	62.3
<b>Caso 3</b>	70	63	64.3
<b>Caso 4</b>	60	70	54.3

**Tabla 9.9** Resumen de resultados

A la vista de los resultados obtenidos se aprecia que es posible modelar, por los dos métodos estudiados, el comportamiento de los vehículos eléctricos escogidos a lo largo de un determinado ciclo de conducción pudiendo obtener resultados con cierta semejanza entre los dos métodos.

De las diferencias obtenidas se concluye que los dos métodos estudiados son complementarios de forma que pueden proporcionar información adicional de manera bidireccional entre ambos métodos. Además se debe tener en cuenta en las diferencias obtenidas entre las simulaciones y los datos oficiales que la aplicación está diseñada para tratar de abarcar el mayor espectro de vehículos posible y los fabricantes no siempre proporcionan toda la información necesaria para poder llevar a cabo una puesta a punto de la herramienta con el resto de parámetros no contemplados en la versión actual.

## Capítulo 10

# Conclusiones

Se puede concluir en primer lugar que se ha conseguido el objetivo de llevar a cabo el desarrollo de una aplicación para la simulación de vehículos eléctricos. Para la comprobación de que las simulaciones realizadas con la aplicación son de utilidad en un ámbito real se ha llevado a cabo el cálculo de la autonomía de diferentes vehículos concluyendo los siguientes puntos:

- El segmento de vehículos elegido para realizar las comparativas ha sido el de cuadríciclos ligeros por considerarlos vehículos sencillos sin complejos sistemas difíciles de modelar que puedan intervenir en su consumo energético.
- El margen de error logrado con las simulaciones de diferentes modelos se encuentra en un rango de  $\pm 17\%$  de la distancia recorrida con medias de un 10.6 % en el método 1 y un 9.6 % en el método 2. Debido a la cuadratura con que presentan los datos de autonomía los fabricantes es de creer que el mismo fabricante también realiza estimaciones para establecer el dato de autonomía en función los diferentes valores registrados en diferentes condiciones de conducción (no especificadas). Por esta razón se considera válido el rango de autonomía conseguido por medio de la simulación para determinadas condiciones.
- De las diferencias entre los resultados de los dos métodos implementados se concluye que si bien la diferencia es pequeña, son métodos complementarios que proporcionan información adicional de manera bidireccional.
- Si bien existen tecnologías de baterías con mejores prestaciones que las baterías de plomo, el conocimiento de las baterías de plomo permite acotar de forma precisa su comportamiento y esto es debido a ser una tecnología madura y fiable.
- Los ciclos de conducción intentan estandarizar situaciones de conducción pero se debe tener en cuenta que son situaciones puntuales y posiblemente la conducción llevada a cabo por cualquier usuario sea diferente y por tanto existirán variaciones en los resultados de autonomía del vehículo.

## Capítulo 11

# Aplicación y líneas futuras

En este apartado se van a plantear diferentes líneas de trabajo que en este proyecto no se han desarrollado para realización de futuros proyectos. Desde el comienzo de este proyecto, se han tenido en cuenta las posibles aplicaciones que se pudiesen llevar a cabo en un futuro y la continuación del desarrollo del mismo. Se establecen como líneas futuras principales los siguientes puntos:

- Comprobación de ciclos de conducción experimentales.
- Ampliar a otros tipos de vehículos eléctricos como motocicletas, turismos y vehículos industriales.
- Aplicación docente: Permitir a los alumnos de “Sistemas Híbridos” la realización de sesiones de prácticas manipulando complejos sistemas de Simulink por medio de la interfaz.
- Herramienta de investigación: A parte de ser utilizada como herramienta docente de aplicación a la asignatura de “Sistemas Híbridos”, el desarrollo de la aplicación acotando sistemas de forma más exhaustiva puede llegar a ser de gran utilidad para labores de investigación.
- Aplicación *on-board*: El cálculo de la descarga de la batería podría realizarse con la adquisición de datos en marcha a bordo del vehículo y monitorizar el estado de carga de la batería en tiempo real.
- Desarrollo de aplicación de carga de baterías.

# Bibliografía

## Libros

*Electric Vehicle Technology Explained* James Larminie and John Lowry  
2003 John Wiley & Sons, Ltd  
ISBN: 0-470-85163-5

Electric vehicle battery systems / Sandeep Dhameja.  
Copyright © 2002 by Butterworth–Heinemann, Ltd  
ISBN 0-7506-9916-7

Electric and Hybrid vehicles – Design Fundamentals  
CRC PRESS, Iqbal Husain  
Boca Raton London New York Washington, D.C.  
ISBN 0-203-00939-8

Maintenance-Free Batteries  
Lead-Acid, Nickel/Cadmium, Nickel/Hydrude A handbook of battery technology.  
D. Berndt  
Research studies press LTD. Taunton, Somerset, England  
ISBN: 0-86380-143-9

Understanding Batteries  
R.M. Dell and D.A.J. Rand  
RSC Paperbacks  
ISBN: 0-85404-605-4

## Artículos:

Guía del vehículo eléctrico. Fundación de la Energía de la comunidad de Madrid – Energy Management Agency – Intelligence Energy Europe  
Capítulo 6: Baterías recargables avanzadas para vehículos eléctricos  
Amarilla J.M Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State-of-the-Art  
Alireza Khaligh, Senior Member, IEEE, Zhihao Li, Student Member, IEEE

A Guide to Understanding Battery Specifications  
MIT Electric Vehicle Team, December 2008

Massachusetts Institute of Technology: <http://web.mit.edu/evt/>

## Contenidos web:

Virtual-Car

<http://www.virtual-car.org/wheels/wheels-road-load-calculation.html>

Developed by Michael J. Safoutin, Instructor of ENGR 100 at the University of Washington, Copyright 2001-2003 Michael J. Safoutin

<http://courses.washington.edu/engr100/>

Dickinson, Blake E. and David H. Swan (1995) EV Battery Pack Life: Pack Degradation and Solutions. [\*Society of Automotive Engineers Technical Paper Series\*](#) (951949)

Catálogo Movele

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Libros en línea:

BARRAGÁN GUERRERO, Diego Orlando. *Handbook of graphical user interface*. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12122> .

# Anexos

## Anexo 1: Vehículo caso 1



Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

## Ficha del Vehículo

Catálogo Mayo 2013



## DENOMINACIÓN

**Fabricante:** Global Electric Motorcars, LLC  
**Marca:** GEM  
**Modelo:** e4  
**Versión:** 4 Pasajeros  
**Segmento:** Cuadriciclo  
**Categoría:**  
**Tipo:** Vehículo Eléctrico (BEV)  
**Código:** 02B03

## DATOS TÉCNICOS

## Motor y Prestaciones

**Potencia nominal(kW/CV):** 4  
**Potencia máxima(kW/CV):** 9  
**Velocidad máxima(km/h):** 40  
**Aceleración 0-50 km/h (seg):** 7  
**Rango de autonomía (km):** 45  
**Consumo(Wh/km):** 160  
**Capacidad útil de carga(kg):** 400

## Peso y Dimensiones

**Peso en vacío con baterías(kg):** 583  
**Longitud(mm):** 3.257  
**Ancho(mm):** 1.336  
**Alto(mm):** 1.778  
**Capacidad del maletero(l):** 75,00  
**Plazas:** 4  
**Puertas:** No Disponible

## Frenos/Suspensión y Neumáticos

**Sistema de frenos delantero:** Hidráulico de Discos  
**Sistema de frenos trasero:** Hidráulicos de Tambor  
**Suspensiones delanteras:** Independiente por Amortiguadores  
**Suspensiones traseras:** Ballestas  
**Neumáticos delanteros:** 165/70R12  
**Neumáticos traseros:** 165/70R12

## Batería

**Tecnología:** Plomo Ácido (Gel)  
**Capacidad(Ah):** 97,6  
**Voltaje(V):** 72  
**Ciclos de carga/descarga:** 1200  
**Tiempo de recarga al 100%(h):** 6  
**Tipo de carga:** Normal  
**Garantía de la batería(años):** 1





Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

## Ficha del Vehículo

Catálogo Mayo 2013

Airbag:	No	Cargador a bordo:	No
Control de estabilidad:	No	Tipo de cargador:	
Control de tracción:	No	Cargador dotado de inteligencia:	Si
Dirección asistida:	No Disponible	Cargador dotado de enclavamiento:	No Disponible
Indicador eficiencia de la conducción:	No Disponible	Longitud cable de recarga (m):	<b>4,00</b>
Aire acondicionado:	No	Cable con protección antivandálica:	No Disponible
Climatizador:	No	Ecualización de baterías:	No Disponible

## DATOS COMERCIALES

Fecha de disponibilidad en España:	2005-01-17	PVP Total sin IVA (€):	18.325
Unidades disponibles anuales:	200	Coste mensual en Leasing(€):	No Disponible
Garantía del vehículo(años):	2	Periodo del Leasing(meses):	No Disponible
		Ayuda MOVELE (€):	No Disponible
Puntos de servicio cualificados/Red comercial:			

## Anexo 2: Vehículo caso 2



Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

**Ficha del Vehículo**

Catálogo Mayo 2013


**DENOMINACIÓN**

**Fabricante:** DONGFENG ELECTRIC VEHICLE CO., LTD.  
**Marca:** BEEPO ELECTRIC VEHICLES  
**Modelo:** BEEPO PONY PICK UP  
**Versión:** PICK UP  
**Segmento:** Cuadriciclo  
**Categoría:**  
**Tipo:** Vehículo Eléctrico (BEV)  
**Código:** 02B34

**DATOS TÉCNICOS**
**Motor y Prestaciones**

**Potencia nominal(kW/CV):** 8  
**Potencia máxima(kW/CV):** 15  
**Velocidad máxima(km/h):** 60  
**Aceleración 0-50 km/h (seg):** 20  
**Rango de autonomía (km):** 75  
**Consumo(Wh/km):** 149  
**Capacidad útil de carga(kg):** 550

**Peso y Dimensiones**

**Peso en vacío con baterías(kg):** 1.150  
**Longitud(mm):** 3.925  
**Ancho(mm):** 1.460  
**Alto(mm):** 1.770  
**Capacidad del maletero(l):** No Disponible  
**Plazas:** 2  
**Puertas:** 2

**Frenos/Suspensión y Neumáticos**

**Sistema de frenos delantero:** DISCO  
**Sistema de frenos trasero:** TAMBOR  
**Suspensiones delanteras:** MCPHERSON  
**Suspensiones traseras:** BALLESTA CON AMORTIGUADOR  
**Neumáticos delanteros:** 165/70R13 83S  
**Neumáticos traseros:** 165/70R13 83S

**Batería**

**Tecnología:** AGM  
**Capacidad(Ah):** 220  
**Voltaje(V):** 72  
**Ciclos de carga/descarga:** 800  
**Tiempo de recarga al 100%(h):** 6  
**Tipo de carga:** Normal  
**Garantía de la batería(años):** 1



MINISTERIO  
DE INDUSTRIA, TURISMO  
Y COMERCIO

IDAE Instituto para la  
Diversificación y  
Ahorro de la Energía



movele  
Proyecto de Movilidad Eléctrica

Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

## Ficha del Vehículo

Catálogo Mayo 2013

Airbag:	No	Cargador a bordo:	Sí
Control de estabilidad:	No	Tipo de cargador:	Monofásico; 230V
Control de tracción:	No	Cargador dotado de inteligencia:	Sí
Dirección asistida:	No Disponible	Cargador dotado de enclavamiento:	No Disponible
Indicador eficiencia de la conducción:	Sí	Longitud cable de recarga (m):	5,00
Aire acondicionado:	No	Cable con protección antivandálica:	No Disponible
Climatizador:	No	Ecualización de baterías:	Sí

## DATOS COMERCIALES

Fecha de disponibilidad en España:	2010-01-01	PVP Total sin IVA (€):	14.220
Unidades disponibles anuales:	1.000	Coste mensual en Leasing(€):	No Disponible
Garantía del vehículo(años):	2	Periodo del Leasing(meses):	No Disponible
		Ayuda MOVELE (€):	No Disponible
Puntos de servicio cualificados/Red comercial:			

## Anexo 3: Vehículo caso 3



Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

## Ficha del Vehículo

Catálogo Mayo 2013



## DENOMINACIÓN

**Fabricante:** Comercial L. Lebrero, s.a.  
**Marca:** FAAM/EVF  
**Modelo:** SMILE  
**Versión:** Multiuso con caja de carga  
**Segmento:** Cuadriciclo  
**Categoría:**  
**Tipo:** Vehículo Eléctrico (BEV)  
**Código:** 02B26

## DATOS TÉCNICOS

## Motor y Prestaciones

**Potencia nominal(kW/CV):** 4  
**Potencia máxima(kW/CV):** 9  
**Velocidad máxima(km/h):** 45  
**Aceleración 0-50 km/h (seg):** 7  
**Rango de autonomía (km):** 70  
**Consumo(Wh/km):** 115  
**Capacidad útil de carga(kg):** No Disponible

## Peso y Dimensiones

**Peso en vacío con baterías(kg):** 750  
**Longitud(mm):** 2.817  
**Ancho(mm):** 1.239  
**Alto(mm):** 1.774  
**Capacidad del maletero(l):** 2.295,00  
**Plazas:** 2  
**Puertas:** 2

## Frenos/Suspensión y Neumáticos

**Sistema de frenos delantero:** Hidráulico/Discos  
**Sistema de frenos trasero:** Hidráulico/Tambor  
**Suspensiones delanteras:** Independiente por amortiguadores  
**Suspensiones traseras:** Independiente por amortiguadores  
**Neumáticos delanteros:** 145/80 R10  
**Neumáticos traseros:** 145/80 R10

## Batería

**Tecnología:** Plomo Gel  
**Capacidad(Ah):** 180  
**Voltaje(V):** 72  
**Ciclos de carga/descarga:** 1000  
**Tiempo de recarga al 100%(h):** 8  
**Tipo de carga:** Normal  
**Garantía de la batería(años):** 1



Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

## Ficha del Vehículo

Catálogo Mayo 2013

Airbag:	No	Cargador a bordo:	Sí
Control de estabilidad:	No	Tipo de cargador:	Trifásico&#44; 230V
Control de tracción:	Sí	Cargador dotado de inteligencia:	Sí
Dirección asistida:	No Disponible	Cargador dotado de enclavamiento:	No Disponible
Indicador eficiencia de la conducción:	Sí	Longitud cable de recarga (m):	5,00
Aire acondicionado:	No	Cable con protección antivandálica:	Sí
Climatizador:	No	Ecualización de baterías:	Sí

## DATOS COMERCIALES

Fecha de disponibilidad en España:	2005-07-21	PVP Total sin IVA (€):	15.960
Unidades disponibles anuales:	500	Coste mensual en Leasing(€):	No Disponible
Garantía del vehículo(años):	2	Periodo del Leasing(meses):	No Disponible
		Ayuda MOVELE (€):	No Disponible
Puntos de servicio cualificados/Red comercial:			



## Anexo 4: Vehículo caso 4



Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

## Ficha del Vehículo

Catálogo Mayo 2013



## DENOMINACIÓN

**Fabricante:** MELEX  
**Marca:** MELEX  
**Modelo:** 961  
**Versión:** TRANSPORTE  
**Segmento:** Cuadriciclo  
**Categoría:**  
**Tipo:** Vehículo Eléctrico (BEV)  
**Código:** 02B89

## DATOS TÉCNICOS

## Motor y Prestaciones

**Potencia nominal(kW/CV):** 4  
**Potencia máxima(kW/CV):** 4  
**Velocidad máxima(km/h):** 36  
**Aceleración 0-50 km/h (seg):** No Disponible  
**Rango de autonomía (km):** 60  
**Consumo(Wh/km):** 145  
**Capacidad útil de carga(kg):** 232

## Peso y Dimensiones

**Peso en vacío con baterías(kg):** 710  
**Longitud(mm):** 3.490  
**Ancho(mm):** 1.280  
**Alto(mm):** 1.725  
**Capacidad del maletero(l):** 450,00  
**Plazas:** 2  
**Puertas:** 2

## Frenos/Suspensión y Neumáticos

**Sistema de frenos delantero:** hidraulico tambor  
**Sistema de frenos trasero:** hidraulico tambor  
**Suspensiones delanteras:** amortiguadores y ballestas  
**Suspensiones traseras:** amortiguadores y ballestas  
**Neumáticos delanteros:** 145/80/B10  
**Neumáticos traseros:** 145/80/B10

## Batería

**Tecnología:** Plomo Ácido  
**Capacidad(Ah):** 232  
**Voltaje(V):** 60  
**Ciclos de carga/descarga:** 750  
**Tiempo de recarga al 100%(h):** 8  
**Tipo de carga:** Normal  
**Garantía de la batería(años):** 1



Promoción de la movilidad sostenible en las ciudades mediante el vehículo eléctrico

### Ficha del Vehículo

Catálogo Mayo 2013

Airbag:	No	Cargador a bordo:	No
Control de estabilidad:	No	Tipo de cargador:	Monofásico&#44; 230V
Control de tracción:	No	Cargador dotado de inteligencia:	Si
Dirección asistida:	No Disponible	Cargador dotado de enclavamiento:	No Disponible
Indicador eficiencia de la conducción:	No Disponible	Longitud cable de recarga (m):	<b>No Disponible</b>
Aire acondicionado:	No	Cable con protección antivandálica:	No Disponible
Climatizador:	No	Ecualización de baterías:	Si

### DATOS COMERCIALES

Fecha de disponibilidad en España:	2011-02-08	PVP Total sin IVA (€):	10.613
Unidades disponibles anuales:	No Disponible	Coste mensual en Leasing(€):	No Disponible
Garantía del vehículo(años):	2	Periodo del Leasing(meses):	No Disponible
		Ayuda MOVELE (€):	No Disponible
Puntos de servicio cualificados/Red comercial:			

